



Guide méthodologique des évaluations rapides de bois énergie

Malick L. Sylla, Nicolas Picard

► To cite this version:

Malick L. Sylla, Nicolas Picard. Guide méthodologique des évaluations rapides de bois énergie. 2005.
cirad-00147063

HAL Id: cirad-00147063

<http://hal.cirad.fr/cirad-00147063>

Preprint submitted on 16 May 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMITÉ PERMANENT
INTER-ÉTATS DE LUTTE CONTRE
LA SÉCHERESSE DANS LE SAHEL



PERMANENT INTERSTATE
COMMITTEE FOR DROUGHT
CONTROL IN THE SAHEL

SECRÉTARIAT EXÉCUTIF

Programme majeur GRN

PROGRAMME RÉGIONAL DE PROMOTION DES ÉNERGIES
DOMESTIQUES ET ALTERNATIVES AU SAHEL (PREDAS)

Guide méthodologique des évaluations rapides de bois énergie

Malick L. SYLLA
&
Nicolas PICARD

Novembre 2005

Table des matières

Introduction	7
1 Planification de l’inventaire forestier	9
1.1 Type d’inventaire	9
1.2 Description préalable de la forêt à inventorier	11
1.2.1 Pluviométrie	11
1.2.2 Limites du massif	11
1.2.3 Topographie	12
1.2.4 Formations végétales	12
1.2.5 Autres informations	12
1.3 Nombre de placettes	13
1.3.1 Relation entre le nombre de placettes, la précision et le coefficient de variation	13
1.3.2 Valeur <i>a priori</i> du coefficient de variation	14
1.4 Forme et taille des placettes	18
1.4.1 Choix <i>a priori</i> de la taille des placettes	21
1.4.2 Optimisation de la taille des placettes	22
1.5 Abaques	25
1.6 Disposition des points d’inventaire	26
1.7 Cas des formations contractées	27
1.7.1 Rappels sur le type de formation concerné	27
1.7.2 Type d’inventaire	29
2 Exécution de l’inventaire forestier	31
2.1 Besoins humains et matériels	31
2.1.1 Équipe d’inventaire	31
2.1.2 Matériel	31
2.2 Cheminement sur le terrain	32
2.2.1 Navigation au GPS	32
2.2.2 Navigation à la boussole	34
2.3 Implantation des placettes	35

2.4	Mesures	36
2.4.1	Individus concernés	36
2.4.2	Mesure de la grosseur	36
2.4.3	Dialogue compteur–pointeur	37
3	Traitement des données d’inventaire	38
3.1	Saisie des données	38
3.1.1	Les erreurs de saisie	38
3.1.2	La meta-information	39
3.1.3	Niveaux emboîtés	40
3.2	Apurement des données	42
3.3	Mise en forme des données	43
3.4	Tarif de cubage	43
3.5	Estimation du volume de bois	44
3.5.1	Moyenne	44
3.5.2	Intervalle de confiance	45
3.5.3	Destination du peuplement	46
3.6	Exemple	46
4	Estimation rapide de la productivité	51
4.1	Rappel de la définition de la productivité	51
4.2	Données sur la productivité en Afrique de l’ouest	55
4.2.1	Formule utilisée pour calculer la productivité	55
4.2.2	Composantes prises en compte pour l’estimation de la production	56
4.2.3	Méthodes de mesure	57
4.2.4	Une productivité ou des productivités?	58
4.3	Les formules de synthèse	61
4.3.1	Comparaison des deux formules	61
4.3.2	Productivité ou potentialité?	62
	Bibliographie	63
	Glossaire	73
	Annexes	76
A	Méthodes d’inventaire par distances	77
B	Tarifs de cubage pour les savanes d’Afrique de l’ouest	81
B.1	Tarifs toutes essences confondues	81
B.1.1	Tarifs de peuplement	81

B.1.2	Tarifs individuels	83
B.2	Tarifs spécifiques	84
B.2.1	<i>Acacia gerrardii</i>	84
B.2.2	<i>Acacia mellifera</i>	85
B.2.3	<i>Acacia senegal</i>	85
B.2.4	<i>Acacia tortilis</i>	85
B.2.5	<i>Afzelia africana</i>	85
B.2.6	<i>Anogeissus leiocarpus</i>	86
B.2.7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	86
B.2.8	<i>Bombax costatum</i> (<i>Bombax buonopozense</i>)	86
B.2.9	<i>Boscia senegalensis</i>	86
B.2.10	<i>Combretum fragrans</i> (<i>Combretum ghasalense</i>)	86
B.2.11	<i>Combretum glutinosum</i>	87
B.2.12	<i>Combretum micranthum</i>	87
B.2.13	<i>Combretum molle</i>	87
B.2.14	<i>Combretum nigricans</i>	87
B.2.15	<i>Commiphora africana</i>	87
B.2.16	<i>Cordyla pinnata</i>	88
B.2.17	<i>Daniellia oliveri</i>	88
B.2.18	<i>Dicrostachys cinerea</i>	88
B.2.19	<i>Diospyros mespiliformis</i>	88
B.2.20	<i>Grewia bicolor</i>	89
B.2.21	<i>Guiera senegalensis</i>	89
B.2.22	<i>Isoberlinia doka</i>	89
B.2.23	<i>Khaya senegalensis</i>	89
B.2.24	<i>Lannea sp.</i>	90
B.2.25	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	90
B.2.26	<i>Terminalia sp.</i>	90
B.2.27	<i>Ziziphus mucronata</i>	90

Liste des tableaux

1.1	Coefficients de variation du nombre de tiges	19
1.2	Coefficients de variation du volume ou de la surface terrière . .	20
1.3	Nombre de placettes à inventorier en fonction de la précision voulue et du coefficient de variation de la grandeur mesurée. .	25
1.4	Coefficient de variation du nombre de tiges et nombre de pla- cettes à inventorier, en fonction de la pluviométrie	26
2.1	Exemple de fiche d'inventaire.	33
3.1	Saisie des données avec trois niveaux emboîtés dans un seul tableau.	41
3.2	Coefficients donnant le volume moyen d'une tige par classes de circonférence à 1 m 30, en fonction de la pluviométrie. . . .	44
3.3	Effectif de tiges vivantes par classe circonférence dans 32 pla- cettes d'inventaire.	47
3.4	Effectif de tiges mortes par classe circonférence dans 32 pla- cettes d'inventaire.	48
3.5	Estimation du volume de bois (mort ou vivant, gros bois et/ou petit bois).	49
4.1	Chiffres de productivité trouvés dans la littérature.	59
A.1	Principales méthodes d'inventaire par distances	79
B.1	Coefficients donnant le volume moyen d'une tige par classes de circonférence à 1 m 30, en fonction de la pluviométrie. . . .	82

Table des figures

1.1	Coefficient de variation du nombre de tiges	17
1.2	Temps total d'inventaire en fonction de la surface unitaire des placettes d'inventaire	24
1.3	Massif forestier autour du village de Dioko	28
1.4	Placement du transect perpendiculaire à la direction des bandes de végétation dans le cas des brousses tigrées	30
2.1	Règle de décision de l'inclusion ou l'exclusion de la placette d'inventaire	35
2.2	Compas de type finlandais	37
3.1	Exemple de trois tableaux de données pour trois niveaux emboîtés.	41
4.1	Schéma montrant les flux entrant et sortant de la forêt considérée comme un stock de bois.	53
4.2	Évolution temporelle schématique du stock $V(t)$ et de la production $P(t)$	53
4.3	Chiffres de productivité trouvés dans la littérature	55
4.4	Comparaison des courbes de Clément et Sylla	62
4.5	Chiffres de productivité trouvés dans la littérature avant 1982	63
4.6	Détermination du recouvrement à partir de la projection verticale des houppiers.	74
A.1	Différents types de distances entre point d'inventaire et arbres du peuplement	78
A.2	Exemples de répartitions spatiales	80

Introduction

La présente étude s'intègre dans la stratégie du Programme Régional de Promotion des Énergies Domestiques et Alternatives au Sahel (PREDAS) pour l'élaboration d'un guide méthodologique et d'un module de formation sur l'inventaire forestier simplifié en vue de la production de bois énergie.

L'un des principes régissant les marchés de bois est le respect du quota de prélèvement. Pour fixer ce quota, il est nécessaire que la quantité de bois que renferme la forêt soit connue. Cette quantité est déterminée par un inventaire. Il faut éviter que l'inventaire sur le terrain ne soit mal adapté — soit par excès d'informations, soit au contraire par défaut d'éléments essentiels, soit encore par le choix d'une technique de mesure trop compliquée ou trop peu précise — au problème qui se pose à l'aménagiste, c'est-à-dire l'obtention au moindre coût de certains renseignements quantitatifs ou qualitatifs concernant sa forêt.

Dans le contexte précis des formations savanicoles, où le produit attendu est essentiellement le bois énergie *a priori*, il ne semble pas opportun d'y investir un budget trop élevé pour la collecte d'informations, au risque de voir les dépenses supérieures aux recettes à tirer de la forêt.

C'est pour répondre à ce souci qu'il a été initié la recherche d'une méthodologie d'inventaire facile à réaliser par les agents forestiers, moins coûteuse, mais surtout statistiquement fiable.

L'objectif de ce document est de mettre à la disposition des agents forestiers des techniques rapides de détermination du stock sur pied, mais aussi de la productivité des formations savanicoles et des formations contractées de plateaux.

L'estimation du stock sur pied résulte de l'inventaire forestier, qui peut être décomposé en trois phases :

- phase de planification, réalisée par un ingénieur, qui vise à choisir le mode d'inventaire en fonction de la précision souhaitée sur l'estimation et des contraintes : nombre et taille des placettes, position des layons, etc.
- phase d'exécution, réalisée par une équipe dirigée par un technicien :

- c'est la phase de mesures sur le terrain ;
- phase de traitement des données, où les mesures récoltées sur le terrain sont agrégées pour produire l'estimation.

Ces trois phases font l'objet des trois premiers chapitres. Le dernier chapitre de ce guide s'attache à l'estimation de la productivité.

Chapitre 1

Planification de l'inventaire forestier

1.1 Type d'inventaire

La première étape consiste à choisir un type d'inventaire. De nombreuses méthodes d'inventaire forestier ont été mises au point et sont recensées dans divers ouvrages ([Lanly, 1981](#); [de Vries, 1986](#); [Schreuder *et al.*, 1993](#); [Shiver & Borders, 1996](#)). On peut classer ces méthodes d'une part selon le type de placette d'inventaire utilisé en chaque point d'inventaire, et d'autre part selon le mode de disposition des points d'inventaire. Parmi les différents types de placette d'inventaire, on distingue habituellement :

- les placettes de taille fixe, ou quadrat ;
- les placettes de taille variable. Parmi ces dernières, on distingue :
 - les méthodes par distance, où la taille de la placette est déterminée par la distance du point d'inventaire au p^e plus proche arbre ;
 - les méthodes d'échantillonnage proportionnelles à la taille ([Gove, 2003](#)), où la taille de la placette est variable selon la taille des arbres inventoriés (exemple : inventaire avec le relascope de Bitterlich).

Le mode de disposition se réfère à la façon dont les points d'inventaire sont positionnés dans l'espace. Ce peut être au hasard (échantillonnage aléatoire) ou de façon régulière sur une grille ou sur des transects (échantillonnage systématique). L'espace peut être préalablement stratifié (échantillonnage stratifié). Enfin les points d'échantillonnage peuvent être répartis selon des patrons emboîtés les uns dans les autres, par exemple des grappes de points d'inventaire réparties selon une grille régulière (échantillonnage hiérarchique).

Le type de placettes d’inventaire et la disposition des points d’inventaire influencent tous deux les propriétés statistiques de l’estimateur du stock de bois sur pied. De façon générale, les méthodes les plus élaborées sont les plus efficaces, c’est-à-dire qu’à effort de mesure constant elles fournissent l’estimation la plus précise. Cependant ces méthodes élaborées sont souvent peu robustes, c’est-à-dire qu’elles sont adaptées à une situation bien précise mais ne peuvent pas s’adapter à une large gamme de situations, et elles sont de plus complexes à mettre en œuvre, que ce soit dans la phase de planification, d’exécution ou de traitement des données.

Pour ces deux dernières raisons, nous favoriserons dans l’optique d’un inventaire rapide de bois énergie une méthode simple et robuste, même si elle n’est pas la plus efficace. La méthode « classique » d’inventaire des formations savanicoles est un inventaire systématique stratifié utilisant des placettes de taille fixe, souvent comprise entre 1 000 et 1 250 m² (en l’occurrence des rectangles 20 × 50 m ou 25 × 50 m ; Mengin-Lecreux & Chabanaud, 1986 ; Arbonnier, 1990) mais pouvant aller jusqu’à 2 500 m². La stratification repose dans le meilleur des cas sur une photo-interprétation de photographies aériennes ; mais une bonne stratification peut être obtenue en s’appuyant simplement sur la toposéquence (Picard *et al.*, 2005a). Une méthode d’inventaire par distances a également été utilisée dans des formations savanicoles sous l’impulsion de Sylla (1997). La méthode par distances de Sylla (1997) a l’avantage d’être extrêmement simple à mettre en œuvre, mais elle a l’inconvénient d’introduire un biais d’estimation. Nous revenons plus en détails en annexe A sur les avantages et inconvénients de cette méthode, que nous recommandons d’utiliser avec prudence.

Pour une estimation rapide du stock sur pied, nous recommandons un inventaire systématique utilisant des placettes de taille fixe. Le caractère systématique sera obtenu en plaçant les points d’inventaire de façon régulière le long de transects. La rapidité de la méthode, par rapport à la méthode « classique », sera obtenue en abandonnant la stratification, en faisant des placettes d’inventaire de petite taille, et en diminuant le taux d’échantillonnage. Bien que la stratification soit abandonnée, on cherchera toutefois à couvrir au mieux les différents types de toposéquences rencontrées dans la forêt.

1.2 Description préalable de la forêt à inventorier

Une fois le type d'inventaire choisi, en l'occurrence donc un inventaire systématique simple avec des placettes de taille fixe, il convient de rassembler des informations préliminaires sur la forêt à inventorier. Ces informations sont celles qui seront nécessaires à la planification de l'inventaire forestier, et plus généralement toute information qui permette de se faire une idée *a priori* de l'état du peuplement. Ces informations seront tirées par exemple de cartes, de photographies aériennes si elles sont disponibles, ou tout simplement d'une reconnaissance sur le terrain. Nous passons à présent en revue les différentes informations qui seront utiles.

1.2.1 Pluviométrie

Dans les formations savanicoles, la pluviométrie est un facteur primordial de structuration de la végétation. Elle influence directement la production et la productivité des peuplements et sert souvent de variables d'entrée pour prédire d'autres caractéristiques du peuplement. Les informations sur la pluviométrie pourront être acquises auprès des autorités compétentes ou dans l'une des nombreuses bases de données météorologiques¹.

1.2.2 Limites du massif

La délimitation du massif à inventorier est un préalable évident. Il est recommandé de parcourir sur le terrain les limites du massif avec GPS en mode « tracking », de manière à obtenir les coordonnées géographiques des limites du massif. Ces limites pourront ensuite être projetées sur une carte à l'aide d'un logiciel de cartographie. Des logiciels très simples de cartographie font l'affaire : il suffit que le logiciel soit capable de gérer des coordonnées géographiques et un fond de carte scanné (inutile de numériser ce fond de carte).

Connaissant les coordonnées géographiques des limites du massif, on peut calculer la superficie du massif et le replacer dans son environnement géographique.

1. À titre d'exemple, le site internet de l'Africa Dissemination Data Service (<http://igskmncnwb015.cr.usgs.gov/adds/>) offre une copie des données de pluviométrie de l'Agrhymet.

1.2.3 Topographie

Comme la méthode d'inventaire recommandée n'est pas stratifiée, on fera en sorte que les points d'inventaire couvrent les différents types de toposéquence existant dans le massif (bas-fonds, plaine, plateau, pentes...) Les unités de toposéquence peuvent être délimitées en parcourant le massif avec un GPS, mais le plus souvent les fonds des cartes au 1:200 000 disponibles dans tous les pays sont suffisantes pour définir les contours des toposéquences.

La toposéquence est important parce qu'elle conditionne la nature du sol (Boulet, 1978) et des écoulements d'eau, et par là même de la végétation. Par exemple les savanes boisées colonisent les bas-fonds à sols alluvionnaires profonds; les galeries longent les dépressions; par contre les plateaux sont dominés par des formations savanicoles arborées ou arbustives.

1.2.4 Formations végétales

L'identification des formations végétales est complémentaire de l'identification des toposéquences. Les deux étant liées, on pourra en fait se contenter de la toposéquence. La définition même de formations végétales est un vaste sujet. Une classification des formations végétales ponctuellement très fine peut être obtenue par les méthode d'analyse phyto-écologique (Nasi, 1994). En pratique une classification plus schématique comme celle de Yangambi (CSA, 1956) sera suffisante. On pourra même se contenter de distinguer :

- les formations boisées : il s'agit des taches de forêts claires, des savanes boisées et aussi des cordons de galeries forestières. Ces peuplements sont couverts par des arbres (de hauteur généralement supérieure à 10 m) et des arbustes dont les cimes sont plus ou moins jointives; l'ensemble du couvert demeure clair. Le recouvrement est compris entre 50 et 70 %. La strate de graminées est parfois peu dense ou en mélange avec une autre végétation herbacée. Ces boisements caractérisent les zones dont la pluviométrie annuelle est supérieure à 800 mm.
- les formations arborées et arbustives : ce sont des peuplements composés d'arbres (hauteur dépassant rarement 8 m) et d'arbustes disséminés dans un tapis herbacé assez dense. Le recouvrement va de 30 à 50 %. Ces peuplements dominent les zones à pluviométrie généralement inférieure à 800 mm.

1.2.5 Autres informations

D'autres informations pourront être recueillies telles que :

- des appréciations sur la mortalité, les coupes frauduleuses, le pâturage,

la mutilation, la régénération...

- la consistance du peuplement : densité, recouvrement, état sanitaire ;
- sa composition : mélange, espèce dominante ;
- sa forme : origine, aspect particulier de l'évolution.

1.3 Nombre de placettes

1.3.1 Relation entre le nombre de placettes, la précision et le coefficient de variation

Le nombre de placettes à mettre en place est fonction avant tout de la précision que l'on souhaite avoir sur l'estimation du stock sur pied. Il dépend également des caractéristiques des placettes (surface et forme) et de la répartition spatiale des arbres. Soit X la grandeur mesurée sur une placette d'inventaire : nombre de tiges, volume..., et S la surface d'une placette. La grandeur μ que l'on cherche à estimer est cette grandeur par unité de surface, c'est-à-dire : μ est la densité de tiges si X est le nombre de tiges, μ est le volume par hectare si X est le volume sur une placette, etc. La finalité de l'inventaire est d'estimer le nombre total de tiges ou le volume total sur l'ensemble du massif, c'est-à-dire $\mu \times A$, où A est la surface du massif. On suppose ici que A est connu sans erreur (d'où l'importance de la phase préalable de cartographie du massif), de sorte que la précision de l'estimation finale est égale à la précision d'estimation de μ . Ce dernier est estimé comme la moyenne empirique de X divisée par la surface des placettes d'inventaire, soit :

$$\hat{\mu} = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^N X_i \quad (1.1)$$

où N est le nombre de placettes d'inventaire et X_i la grandeur mesurée sur la i^{e} placette. Comme la surface S est fixe, la précision sur $\hat{\mu}$ est égale à la précision sur la moyenne empirique de X .

La loi de distribution de X est variable et dépend des caractéristiques de la placette d'inventaire et de la répartition spatiale des arbres. Par exemple si les tiges sont réparties au hasard, le nombre de tiges dans une placette de surface S suit une loi de Poisson de paramètre μS (où μ est la densité de tiges). Si les arbres sont répartis de manière agrégée (le cas le plus fréquent en savane), le nombre de tiges est sur-dispersé, c'est-à-dire que sa variance est plus forte que sa moyenne, avec une loi de distribution qui peut souvent être approchée par une loi binomiale négative ([Eberhardt, 1967](#); [Picard *et al.*, 2004](#)).

Quoi qu'il en soit, le théorème central-limite permet de dire² que la moyenne empirique de X converge en loi lorsque le nombre de placettes tend vers l'infini vers une loi normale de moyenne μS et d'écart-type σ/\sqrt{N} , où σ^2 est la variance de X . La précision sur la moyenne empirique de X , définie comme la demi-amplitude de son intervalle de confiance au seuil α divisée par son espérance, vaut ainsi approximativement (l'approximation étant d'autant meilleure que N est élevé) :

$$\varepsilon = \frac{t_{N-1;\alpha/2}}{\sqrt{N-1}} \frac{\sigma}{\mu S}$$

où ε est la précision et $t_{N-1;\alpha/2}$ le quantile au seuil $1 - \alpha/2$ d'une loi de Student à $N - 1$ degrés de liberté. La quantité $\sigma/(\mu S)$ représente le coefficient de variation, noté CV, de X . Le quantile $t_{N-1;\alpha/2}$ tend lorsque N tend vers l'infini vers le quantile au seuil $1 - \alpha/2$ d'une loi normale centrée réduite, et on peut donc l'approcher par 1,96 pour $\alpha = 5\%$, que l'on arrondira même à 2. Au bout du compte, le nombre N de placettes est relié à la précision ε sur la grandeur μ à estimer et le coefficient de variation de X par la relation approximative :

$$N \simeq 4 \left(\frac{\text{CV}}{\varepsilon} \right)^2 + 1 \quad (1.2)$$

La précision ε est fixée par le planificateur de l'inventaire. La valeur de ε est d'autant plus petite que la précision est meilleure (une précision de 5 % est meilleure qu'une précision de 10 %). Dans les inventaires « classiques », on cherche à obtenir typiquement une précision de 10 % sur l'estimation de μ (soit $\varepsilon = 0.1$). Dans le cas d'une estimation rapide de la ressource, on pourra fixer une précision moindre (c'est-à-dire une valeur de ε plus élevée) de manière à réduire le nombre de placettes d'inventaire.

1.3.2 Valeur *a priori* du coefficient de variation

Pour calculer le nombre N de placettes, il reste à avoir une idée de la valeur du coefficient de variation CV de X . Cette valeur *a priori* du CV n'a pas besoin d'être très précise, dans la mesure où elle sera re-calculée *a posteriori* à la fin de l'inventaire, pour obtenir la valeur effective de la précision obtenue. Pour obtenir cette valeur du CV, soit on réalisera un pré-inventaire rapide, soit on prendra des valeurs dans la littérature. Dans le cas

2. Une des conditions de ce théorème est que les X_i soient indépendants, ce qui suppose qu'il n'y a pas d'auto-corrélation spatiale entre les X_i ; en pratique, il suffira que les placettes d'inventaire soient suffisamment éloignées les unes des autres, ce qui est vérifié pour les taux d'échantillonnage couramment utilisés.

d'une estimation rapide de la ressource en bois énergie, la seconde option est la plus recommandable.

On peut ainsi se reporter à de précédents inventaires (par exemple [Mengin-Lecreulx & Chabanaud, 1986](#)) ou à des études spécifiques ([Picard *et al.*, 2004](#)) pour obtenir des valeurs du coefficient de variation. Sans prétention à l'exhaustivité, nous donnons ici quelques valeurs qui pourront servir de points de repère. Il faut avoir à l'esprit que le coefficient de variation dépend de la surface et de la forme des placettes d'inventaire, ainsi que du mode de répartition spatiale des arbres.

CV du nombre de tiges

[Picard *et al.* \(2004\)](#) ont montré, en s'appuyant sur 6 placettes permanentes au Mali, que la répartition spatiale des arbres pouvait être modélisée par un processus de Matérn. Sans entrer dans les détails, les processus de Matérn forment une famille de processus ponctuels permettant de générer des répartitions spatiales allant de très agrégées à aléatoires ([Cressie, 1991](#); [Stoyan & Stoyan, 1994](#); [Møller & Waagepetersen, 2004](#)). Les processus de Matérn génèrent des agrégats d'arbres autour de points parents qui sont eux-mêmes disposés au hasard. Ils imitent ainsi le processus biologique de dispersion des enfants autour de leurs parents. Les processus de Matérn dépendent de trois paramètres : la densité ω de points parents, la fécondité f des parents (ce qui représente aussi le nombre moyen de tiges par agrégat), et la distance D de dispersion des enfants autour de leur parent. Pour un tel processus, le coefficient de variation du nombre X de tiges dans une placette de surface S vaut :

$$CV = \frac{\sigma}{\omega f S} \quad (1.3)$$

avec ([Stoyan & Stoyan, 1994](#), p.249) :

$$\sigma^2 = \text{Var}(X) = 2\pi(\omega f)^2 \int_0^\infty \gamma(r) r g(r) dr + \omega f S - (\omega f S)^2 \quad (1.4)$$

où g est la fonction de corrélation de paires du processus ponctuel et γ est la fonction de covariance d'ensemble isotropisée. La fonction de corrélation de paires d'un processus de Matérn de paramètres (D, ω, f) est ([Stoyan & Stoyan, 1994](#), p.311) :

$$g(r) = \begin{cases} 1 + \frac{2}{\omega(\pi D)^2} [\arccos(z) - z\sqrt{1-z^2}] & (z \leq 1) \\ 1 & (z > 1) \end{cases}$$

avec $z = r/(2D)$. Quant à la fonction de covariance d'ensemble isotropisée, elle ne dépend que la taille et de la forme des placettes d'inventaire (Stoyan & Stoyan, 1994, p.122–123) :

- pour une placette circulaire de rayon $R = \sqrt{S/\pi}$,

$$\gamma(r) = \begin{cases} 2R^2 \arccos\left(\frac{r}{2R}\right) - \frac{1}{2}r\sqrt{4R^2 - r^2} & (r \leq 2R) \\ 0 & (r > 2R) \end{cases}$$

- pour une placette rectangulaire de petit côté a et de grand côté b avec $ab = S$,

$$\gamma(r) = \frac{S}{\pi} \times \begin{cases} \pi - 2x - 2x/\beta + x^2/\beta & (0 \leq x \leq 1) \\ 2 \arcsin(1/x) - 1/\beta - 2(x - u) & (1 < x \leq \beta) \\ 2 \arcsin[(\beta - uv)/x^2] + 2u \\ \quad + 2v/\beta - \beta - (1 + x^2)/\beta & (\beta < x < \sqrt{1 + \beta^2}) \\ 0 & (x \geq \sqrt{1 + \beta^2}) \end{cases}$$

avec $x = r/a$, $u = \sqrt{x^2 - 1}$, $v = \sqrt{x^2 - \beta^2}$ et $\beta = b/a$.

On remarquera que la fonction $\gamma(r)$ s'annule pour $r \geq r_{\max}$ avec $r_{\max} = 2R$ pour une placette circulaire de rayon R et $r_{\max} = a\sqrt{1 + \beta^2}$ pour une placette rectangulaire de côtés a et βa , de sorte que l'intégrale de (1.4) est en fait sur une intégrale sur l'intervalle $[0, r_{\max}]$.

Pour pouvoir utiliser ces relations, il faut pouvoir prédire les valeurs des paramètres (D , ω , f) en fonction de caractéristiques simples du peuplement. On utilisera pour cela la pluviométrie comme variable d'entrée, même si les relations ne sont pas très bonnes. Plus la pluviométrie est faible, plus la végétation est contractée. Cela se traduit par des valeurs de D qui diminuent quand la pluviométrie diminue. On pourra utiliser la relation suivante :

$$D = \frac{1}{1.06 - 0.83p}$$

où p représente la pluviométrie annuelle exprimée en mètres et la distance de dispersion est exprimée en mètres. Plus la pluviométrie est forte, plus la végétation est dense. Cela se traduit par des valeurs de ωf qui augmentent quand la pluviométrie augmente. Par ailleurs la fécondité reste à peu près constante quand la pluviométrie varie. On pourra ainsi utiliser comme relation pour prédire ω et f :

$$\begin{aligned} f &= 1.82 \\ \omega &= 51.20 \exp(3.00p) \end{aligned}$$

où p est exprimé en mètres et ω en ha^{-1} , ces deux valeurs étant relatives aux tiges de plus de 10 cm de circonférence à la base.

La figure 1.1 montre la valeur du CV du nombre de tiges de plus de 10 cm de circonférence à la base ainsi calculé, en fonction de la surface de la placette d'inventaire, pour trois pluviométrie et trois formes de placette (circulaire, carrée, rectangulaire avec un ratio grand côté sur petit côté égal à 2,5). Le CV décroît avec la surface. Si les arbres étaient répartis au hasard, la variance (σ^2) du nombre de tiges serait égale à la moyenne (μS) du nombre de tiges, et donc le CV serait égal à l'inverse de la racine carrée de la moyenne du nombre de tiges ($\text{CV} = 1/\sqrt{\mu S}$). Ici, du fait du caractère agrégé des arbres, on a : $\text{CV} > 1/\sqrt{\mu S}$. La décroissance du CV avec la surface S est donc plus lente que $1/\sqrt{S}$.

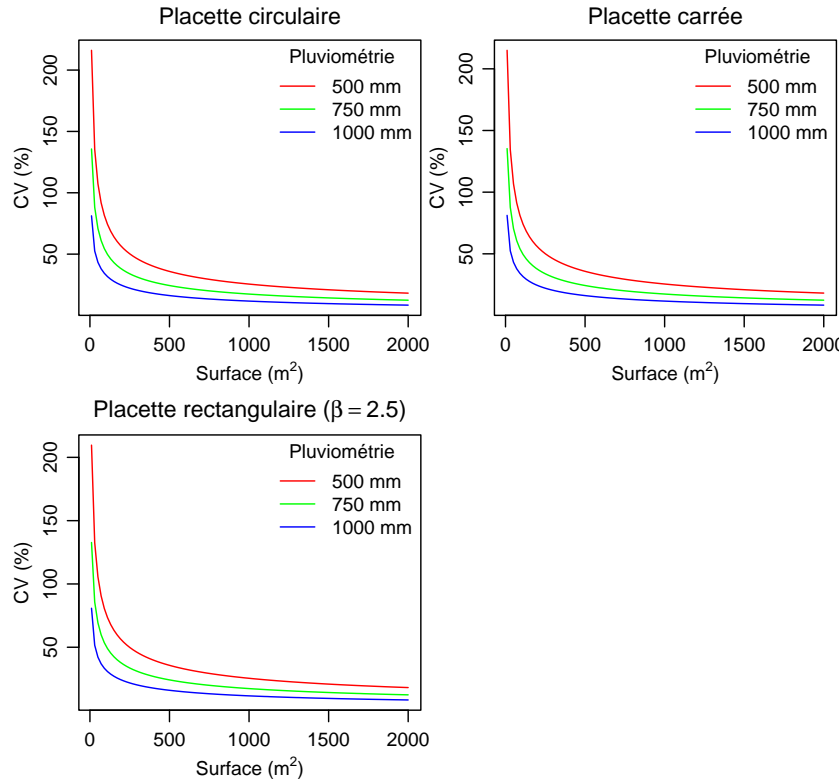


FIG. 1.1 – Coefficient de variation du nombre de tiges de plus de 10 cm de circonférence à la base en fonction de la surface de la placette d'inventaire, pour trois pluviométrie et trois formes de placette.

La figure 1.1 montre également que la forme de la placette a peu d'importance, même si une inspection détaillée révèle que, à surface et pluviométrie

égales, le CV est plus élevé pour une placette circulaire que pour une placette rectangulaire ou carrée, et que, parmi les formes rectangulaires, le CV est d'autant plus petit que la placette est allongée (β élevé).

Les valeurs théoriques que nous venons de calculer du CV peuvent être confrontées à des valeurs concrètes obtenues lors d'inventaires forestiers. Le tableau 1.1 récapitule des valeurs du CV du nombre de tiges trouvées dans la littérature (Bellefontaine *et al.*, 1997). Les valeurs ne sont pas directement comparables du fait que les CV sont souvent relatifs à une catégorie de grosseur des arbres, donc à des effectifs inférieurs à l'effectif total (toutes classes de diamètre confondues), ce qui a tendance à augmenter les CV (on remarque d'ailleurs que le CV augmente lorsque la classe de grosseur augmente). D'un autre côté, les valeurs théoriques du CV que nous avons calculées sous-estiment vraisemblablement le CV car le modèle utilisé ne tient pas compte de l'hétérogénéité du milieu et notamment de la coexistence de plusieurs faciès au sein du massif.

CV du volume ou de la surface terrière

Nous ne disposons pas pour le volume de bois ou pour la surface terrière, comme pour le nombre de tiges, d'un modèle théorique permettant de calculer le CV quels que soient la forme de la placette, sa surface et la pluviométrie. Nous devons donc nous contenter de valeurs relevées dans la littérature. Le tableau 1.2 donne un aperçu de valeurs issues d'inventaires forestiers. Afin de faire varier la surface des placettes, on pourra supposer en première approximation que le coefficient de variation varie de façon inversement proportionnelle à la racine carrée de la surface des placettes d'inventaire. Ainsi, si on a un coefficient de variation $CV = 50\%$ pour une placette de $S = 0.1$ ha (soit $1\,000\text{ m}^2$), on aura grossièrement, toutes choses égales par ailleurs, pour une placette de $S' = 100\text{ m}^2$ un coefficient de variation égal à :

$$CV' = CV \sqrt{\frac{S}{S'}} = 50 \times \sqrt{\frac{1000}{100}} = 158\% \quad (1.5)$$

1.4 Forme et taille des placettes

La détermination de la forme et de la taille des placettes peut résulter soit d'un choix *a priori*, soit d'un calcul d'optimisation. La seconde option est plus rigoureuse mais nécessite des investigations plus poussées que la première option, qui est davantage recommandable dans l'optique d'une estimation rapide de la ressource en bois. Dans les deux cas, la détermination de la

TAB. 1.1 – *Coefficients de variation du nombre de tiges répertoriés dans la littérature.*

Forêt, pays	Végétation	Pluvio. (mm)	Grandeur mesurée	Surface des parcelles	Coefficient de variation	Référence
Faïra, Niger	brousse tigrée et tachetée	600	nombre de tiges de diamètre à 20 cm de hauteur compris entre 2 et 8 cm	0,1 ha (50 × 20 m)	30–40 %	Mengin-Lecreulx & Chabanaud (1986)
Faïra, Niger	brousse tigrée et tachetée	600	nombre de tiges de diamètre à 20 cm de hauteur compris entre 8 et 20 cm	0,1 ha	60–75 %	Mengin-Lecreulx & Chabanaud (1986)
Faïra, Niger	brousse tigrée et tachetée	600	nombre de tiges de diamètre à 20 cm de hauteur supé- rieur à 20 cm	0,3 ha ^a ou 0,1 ha ^b	100 %	Mengin-Lecreulx & Chabanaud (1986)
Woro, Mali	savane arbustive et arborescente	600–700		0,1 ha	69 %	Parkan <i>et al.</i> (1988)
Morondava, Madagascar	forêt dense sèche	500–1000	essences exploitées de dia- mètre ≥ 37 cm	4 ha (40 × 1000 m)	26 %	Covi (1988)
Morondava, Madagascar	forêt dense sèche	500–1000	essences exploitables de dia- mètre compris entre 30 et 37 cm	4 ha (40 × 1000 m)	33 %	Covi (1988)
Morondava, Madagascar	forêt dense sèche	500–1000	essences non exploitées de diamètre ≥ 30 cm	4 ha (40 × 1000 m)	49 %	Covi (1988)
Dabo, Sénégal	forêt claire et savane arborescente	800–1000		0,5 ha	32 %	Fall & Gueye (1993a,b)

^a brousse tachetée, ^b brousse tigrée

TAB. 1.2 – *Coefficients de variation du volume de bois ou de la surface terrière répertoriés dans la littérature. D_{20} désigne ici le diamètre à 20 cm de hauteur.*

Forêt, pays	Végétation	Pluvio. (mm)	Grandeur mesurée	Surface des placettes	Coefficient de variation	Référence
Burkina Faso	jachère		volume total	0,25 ha	90–100 %	
Burkina Faso	forêt claire et sa- vane arborée		volume total	0,25 ha	40–70 %	
Burkina Faso	savane arbustive		volume total	0,25 ha	50–90 %	Compaoré & Laban (1983)
Yabo, Burkina Faso	formation ripi- cole	600	volume	0,25 ha	53 %	Compaoré & Laban (1983)
Yabo, Burkina Faso	savane boisée	600	volume	0,25 ha	40–70 %	Compaoré & Laban (1983)
Yabo, Burkina Faso	savane arbustive	600	volume	0,25 ha	50 %	Compaoré & Laban (1983)
Faïra, Niger	brousse tigrée et tachetée	600	volume des tiges de $2 \leq D_{20} < 4$ cm	0,1 ha	35–45 %	Mengin-Lecreux & Chabanaud (1986)
Faïra, Niger	brousse tigrée et tachetée	600	volume des tiges de $4 \leq D_{20} < 8$ cm	0,1 ha	50–60 %	Mengin-Lecreux & Chabanaud (1986)
Faïra, Niger	brousse tigrée et tachetée	600	volume des tiges de $8 \leq D_{20} < 20$ cm	0,1 ha	65–85 %	Mengin-Lecreux & Chabanaud (1986)
Faya, Monts Mandingues, Dioforongo, Mali	formation pauvre à riche	750–1000	surface terrière	0,2 ha	37 %	Nasi & Sabatier (1988)
Morondava, Madagascar	forêt dense sèche	500–1000	volume des essences exploi- tées de diamètre ≥ 37 cm	4 ha (40×1000 m)	28 %	Covi (1988)
Woro, Mali	savane arbustive et arbotée	600–700	volume	0,1 ha	80 %	Parkan <i>et al.</i> (1988)
Dabo, Sénégal	forêt claire et savane arborée	800–1000	volume	0,5 ha	35 %	Fall & Gueye (1993a,b)

taille et de la forme des placettes part du principe que l'effort d'inventaire que l'on est prêt à consentir est majoré, et qu'il faut donc rechercher la forme et la taille des placettes qui maximisent la précision de l'estimation à taux d'échantillonnage fixé.

On peut d'ores et déjà régler la question de la forme de la placette dans la mesure où celle-ci a peu d'incidence sur la précision de l'estimation (figure 1.1). À surface constante, les placettes rectangulaires allongées ont certes un léger avantage en termes de précision de l'estimation, mais elles ont l'inconvénient d'avoir un périmètre plus élevé et donc de multiplier les erreurs potentielles de positionnement des arbres à l'intérieur ou à l'extérieur des placettes. À surface égale, la forme qui présente le plus petit périmètre, et donc le plus faible risque d'erreur de positionnement à l'intérieur ou à l'extérieur de la placette, est le disque : le périmètre d'un disque de surface S est égal à $2\sqrt{\pi S}$ tandis que le périmètre d'un rectangle de surface S et de ratio grand côté sur petit côté valant β est égal à $2(\sqrt{S/\beta} + \sqrt{\beta S})$.

1.4.1 Choix *a priori* de la taille des placettes

Si A est la surface du massif à inventorier, S la surface des placettes d'inventaire, et N leur nombre, le taux d'échantillonnage τ est égal à :

$$\tau = \frac{NS}{A}$$

Il représente la fraction du massif effectivement mesurée lors de l'inventaire. Le taux d'échantillonnage représente l'effort d'inventaire que l'on est prêt à consentir et est donc majoré, ne serait-ce que par le budget prévu pour l'inventaire. Il s'agit donc de raisonner le choix de la surface S à τ fixé. Il découle de l'équation (1.1) que la variance de l'estimateur de la densité que l'on cherche à estimer vaut :

$$\text{Var}(\hat{\mu}) = \frac{\sigma^2}{NS^2}$$

où σ est, rappelons-le, l'écart-type de la grandeur X mesurée sur une placette d'inventaire. En introduisant le taux d'échantillonnage, on obtient :

$$\text{Var}(\hat{\mu}) = \frac{\sigma^2}{\tau AS}$$

La relation entre σ et la surface S est complexe, comme le témoigne l'équation (1.4) dans le cas du nombre de tiges dont la répartition spatiale est modélisée

par un processus de Matérn. On peut toutefois, pour simplifier, approcher cette relation par une fonction puissance (CTFT, 1989) :

$$\sigma = \text{cste} \times S^a \quad (1.6)$$

où « cste » est une constante et a un exposant. Lorsque les arbres sont répartis au hasard, la variance du nombre de tiges est égale à son espérance et $a = 1/2$. Lorsque les arbres sont agrégés, ce qui est majoritairement le cas dans les formations savanicoles, $a > 1/2$. Au final,

$$\text{Var}(\hat{\mu}) \propto S^{2a-1}$$

Lorsque les arbres sont agrégés, l'exposant $2a - 1$ est positif, et donc la variance de l'estimateur $\hat{\mu}$ augmente avec la taille des placettes, à *taux d'échantillonnage fixé*. En d'autres termes, à taux d'échantillonnage fixé et lorsque les arbres sont agrégés (ce qui est le cas des formations savanicoles), on a intérêt à faire beaucoup de placettes de petite taille plutôt que quelques placettes de grande taille. Ce raisonnement a bien sûr ses limites dans la mesure où, par exemple :

1. le temps mis pour installer et inventorier 1 000 placettes de 1 m² est largement supérieur à celui nécessaire pour installer et inventorier une seule placette de 1 000 m²,
2. les périmètres additionnés de 1 000 placettes de 1 m² (soit 4 km pour des placettes carrées) est largement supérieur au périmètre d'une placette de 1 000 m² (soit 140 m pour une placette 20 × 50 m), ce qui multiplie d'autant le risque de mauvais positionnement des arbres à l'intérieur ou à l'extérieur des placettes.

Il faut donc trouver un compromis entre la petitesse des placettes et la facilité de leur installation sur le terrain. Notre expérience nous amène à recommander, dans l'optique d'un inventaire rapide de la ressource en bois énergie, des placettes circulaires de rayon 5 m (soit de surface $S = \pi \times 25 = 78.5$ m²). La forme circulaire s'est avérée pratique sur le terrain : il suffit de balayer l'espace avec une cordelette longue de 5 m autour du point d'inventaire. Le rayon de 5 m est à la fois suffisamment petit pour que la mesure soit pratique et grand pour que la placette ait une surface significative. La petitesse de ces placettes au regard de celles utilisées dans les inventaires « classiques » (autour de 1 000 m²) renvoie aussi à la méthode du 4^e arbre de Sylla (1997).

1.4.2 Optimisation de la taille des placettes

La méthode d'optimisation de la taille des placettes rationalise les arguments heuristiques qui ont été développés dans le paragraphe précédent.

Nous la rappelons ici rapidement car c'est la méthode qui devrait être utilisée de façon rigoureuse, mais nous ne la recommandons pas dans l'optique d'une estimation rapide de la ressource à cause de sa complexité et des paramètres supplémentaires qu'elle requiert.

L'optimisation de la taille des placettes consiste à rechercher la taille de placette qui minimise le temps (donc le coût) d'inventaire pour une précision d'estimation à atteindre fixée (Johnson & Hixon, 1952; Bormann, 1953; Savage, 1956; Zeide, 1980; Gambill *et al.*, 1985; Schreuder *et al.*, 1987; Hebert *et al.*, 1988; Grenier *et al.*, 1991). On peut montrer que la solution de ce problème d'optimisation est identique à la solution du problème d'optimisation qui consiste à rechercher la taille de placette qui maximise la précision de l'estimation à temps d'inventaire fixé. Nous présentons ici le problème tel qu'il a été formulé par Zeide (1980) ou Gambill *et al.* (1985). Le temps total d'inventaire T s'écrit :

$$T = N(t + t^*)$$

où N est, rappelons-le, le nombre de placettes d'inventaire, t^* est le temps unitaire pour installer et mesurer une placette d'inventaire, et t est le temps unitaire pour se déplacer d'une placette à une autre. Si les placettes sont disposées selon une grille régulière (échantillonnage systématique), quelques considérations de géométrie conduisent à la relation suivante entre le temps de déplacement unitaire t , la surface A du massif à inventorier, le nombre N de placettes et la vitesse de marche v :

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{A}{N}}$$

On suppose par ailleurs que le temps unitaire pour installer et mesurer une placette se décompose en un temps de délimitation proportionnel au périmètre de la placette et en un temps de mesure proportionnel à la surface de la placette, c'est-à-dire pour des placettes circulaires :

$$t^* = \rho S + 2\eta\sqrt{\pi S}$$

où ρ est le temps surfacique de mesure, c'est-à-dire le temps requis pour mesurer un mètre carré de forêt, et η est le temps périmétrique de délimitation, c'est-à-dire le temps requis pour délimiter un mètre linéaire du périmètre d'une placette. En reportant cette relation dans la précédente, on obtient :

$$T = \frac{1}{v} \sqrt{AN} + \rho NS + 2\eta N \sqrt{\pi S}$$

Les paramètres ρ , η , v et A sont fixes. L'équation (1.2) exprime N en fonction de la précision voulue ε et du coefficient de variation CV. Le coefficient de

variation peut lui-même être exprimé en fonction de la taille des placettes : dans le cas du nombre de tiges, on pourra utiliser la relation théorique (1.3) ; dans le cas du volume, on pourra utiliser les relations approchées (1.5) ou une relation puissance empirique (1.6) :

$$CV \propto S^{a-1}$$

En combinant toutes ces relations, on aboutit finalement à une expression du temps total d'inventaire T en fonction de la surface unitaire S des placettes d'inventaire, de la précision voulue ε et de divers paramètres fixes. Il ne reste alors qu'à rechercher de manière numérique la valeur de S qui minimise T à ε fixé.

À titre d'exemple, la figure 1.2 présente le temps total d'inventaire T en fonction de la surface unitaire S des placettes d'inventaire pour une précision ε fixée à 10 %. Pour cet exemple, la grandeur mesurée est le nombre de tiges de plus de 10 cm de circonférence à la base, l'expression du CV est donnée par les équations (1.3) et suivantes, et les paramètres sont fixés à : $p = 800$ mm pour la pluviométrie annuelle, $A = 500$ ha pour la superficie du massif à inventorier, les placettes sont de forme circulaire, $v = 5$ km h⁻¹ pour la vitesse de marche, $\rho = 3.5 \cdot 10^{-3}$ h m⁻² pour le temps surfacique de mesure (ce qui correspond à 21 min pour inventorier 100 m²) et $\eta = 1.4 \cdot 10^{-3}$ h m⁻¹ pour le temps périmétrique de délimitation (ce qui correspond à 2,5 min pour délimiter une placette circulaire de rayon 5 m). L'optimum est obtenu

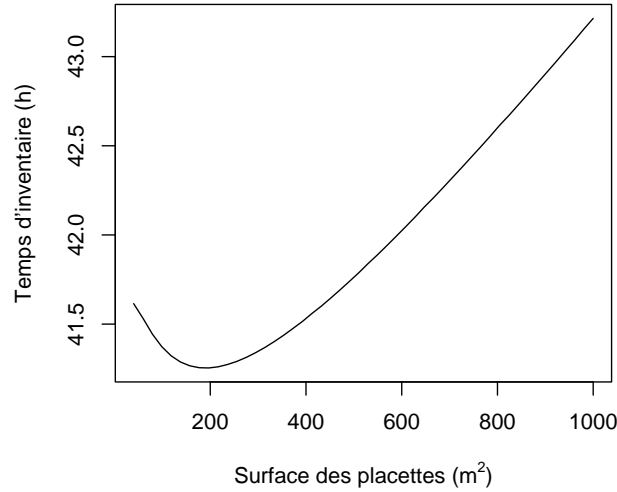


FIG. 1.2 – *Temps total d'inventaire (en heures) en fonction de la surface unitaire des placettes d'inventaire (en m²).*

pour des placettes de 197 m². Il faut alors inventorier $N = 50$ placettes pour

arriver à la précision voulue et le temps total d'inventaire est de 41 h 15 min. Bien entendu, ces chiffres n'ont qu'une portée pédagogique. Il faudrait adapter les valeurs des paramètres à chaque situation réelle (ne serait-ce que parce que les temps unitaires de mesure dépendent du diamètre minimum de comptage).

1.5 Abaques

L'ensemble des relations données précédemment permettent en principe de planifier la taille, le nombre et la forme des placettes d'inventaire de manière raisonnée en fonction des objectifs visés. Il est clair cependant que ces calculs sont relativement compliqués, ce qui peut être un frein à leur emploi sur le terrain lors d'une estimation rapide de la ressource. Aussi ce paragraphe a pour objectif de fournir des abaques permettant de décider rapidement du dispositif d'inventaire sur le terrain à partir de quelques paramètres simples d'entrée. Le tableau 1.3 à double entrée donne le nombre de placettes à inventorier en fonction de la précision voulue (5, 10 ou 20 %) et du coefficient de variation de la grandeur mesurée.

TAB. 1.3 – *Nombre de placettes à inventorier en fonction de la précision voulue et du coefficient de variation de la grandeur mesurée.*

Précision (en %)	Coefficient de variation (en %)							
	20	40	60	80	100	150	200	250
5	64	256	576	1 024	1 600	3 600	6 400	10 000
10	16	64	144	256	400	900	1 600	2 500
20	4	16	36	64	100	225	400	625

Il reste à présent à relier les caractéristiques des placettes au coefficient de variation de la grandeur mesurée. Pour que le nombre d'entrées des abaques reste raisonnable, un certain nombre d'hypothèses sont faites *a priori* en accord avec les recommandations faites précédemment :

- forme des placettes : les placettes sont de forme circulaire ;
- taille des placettes : le rayon des placettes est de 5 m, soit une superficie de 78,5 m².

Faute d'avoir un modèle permettant de prédire le coefficient de variation du volume en fonction de la pluviométrie, on prendra comme référence l'expression théorique (1.3) du coefficient de variation du nombre de tiges, en prenant garde à ce que :

- ce coefficient est relatif au nombre total de tiges de plus de 10 cm de

circonférence à la base,

- la formule théorique sous-estime le coefficient de variation puisqu'elle néglige les variations de faciès au sein du massif.

On peut alors prédire le coefficient de variation en fonction de la pluviométrie. Le tableau 1.4 donne le coefficient de variation du nombre de tiges, et le nombre de placettes à inventorier pour différents niveaux de précision, en fonction de la pluviométrie. Comme le coefficient de variation est vraisemblablement sous-estimé, le nombre de placettes indiqué est un minimum. Pour cette raison également, on aura intérêt, même dans le cas d'une estimation rapide de la ressource, à tabler sur une précision de 10 % (ce qui renvoie à l'avant-dernière colonne du tableau 1.4). Il faut garder à l'esprit que les chiffres indiqués ne sont valables que pour des placettes d'inventaire circulaires de rayon 5 m, et pour un inventaire des tiges de plus de 10 cm de circonférence à la base.

TAB. 1.4 – *Coefficient de variation du nombre de tiges de plus de 10 cm de circonférence à la base et nombre de placettes à inventorier, en fonction de la pluviométrie. Les chiffres indiqués ne sont valables que pour des placettes d'inventaire circulaires de rayon 5 m.*

Pluviométrie (mm)	CV (%)	Nombre de placettes		
		$\varepsilon = 5\%$	$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 20\%$
500	87	1 218	304	76
550	81	1 039	260	65
600	74	885	221	55
650	69	753	188	47
700	63	639	160	40
750	58	541	135	34
800	53	456	114	28
850	49	382	96	24
900	45	318	80	20
950	40	262	66	16
1000	36	212	53	13

1.6 Disposition des points d'inventaire

Les points d'inventaire seront disposés de façon régulière le long de transects. Si le nombre de points d'inventaire est suffisamment élevé, les points pourront être disposés sur une grille de côté $a = \sqrt{A/N}$ où A est la superficie

du massif à inventorier et N le nombre de points d'inventaire. Les transects sont alors tous parallèles et, pour la facilité du travail sur le terrain, on aura intérêt à les orienter nord-sud ou est-ouest. Cette approche est faisable si le maillage a est suffisamment petit pour qu'on soit assuré de couvrir tous les types de faciès présent dans le massif.

Autrement, on aura intérêt à ouvrir quelques transects qui traversent au mieux les différents faciès du massif. Les transects doivent rester linéaires mais leur orientation peut être quelconque. Il n'y a pas de règle pour le nombre de transects, leur orientation ou l'espacement entre transects que de couvrir au mieux les différents faciès présents dans le massif. Pour planifier les transects, on pourra s'appuyer sur le tracé des reliefs sur une carte géographique en faisant l'hypothèse que la toposéquence reflète les faciès. Si la longueur totale cumulée des transects mis en place est L , l'espacement entre deux points d'inventaire consécutifs sera : $a = L/N$.

À titre d'exemple, la figure 1.3 montre les limites d'un massif autour du village de Dioko dans la commune de Tienfala, cercle de Koulikoro au Mali, et deux transects qui y ont tracés pour couvrir les différentes unités de toposéquence. Le premier transect fait 5 km de long tandis que le second fait 2 km de long. Si on doit y installer 40 points d'inventaire, l'espacement entre deux points consécutifs sera alors de 175 m.

La position des points d'inventaire devra être enregistrée

- soit sous forme de coordonnées géographiques si on prévoit l'utilisation d'un GPS sur le terrain pour se positionner aux points d'inventaire,
- soit en notant l'azimut des transects par rapport à la direction nord-sud si on prévoit un cheminement à la boussole sur le terrain (cf. figure 1.3).

Dans le second cas, il faudra s'arranger pour que le point de départ de chaque transect soit un point remarquable sur le terrain, ou alors que les transects soient parallèles avec un espacement connu entre les transects (cas d'une grille régulière).

1.7 Cas des formations contractées

1.7.1 Rappels sur le type de formation concerné

Les formations contractées de plateau ont fait l'objet d'une large description par Ichaou (1995, 2000). Nous pensons ici utile de donner quelques indications sur ces formations qui forment un ensemble géographique dans certaines régions du Sahel en général et au Niger en particulier, constituées

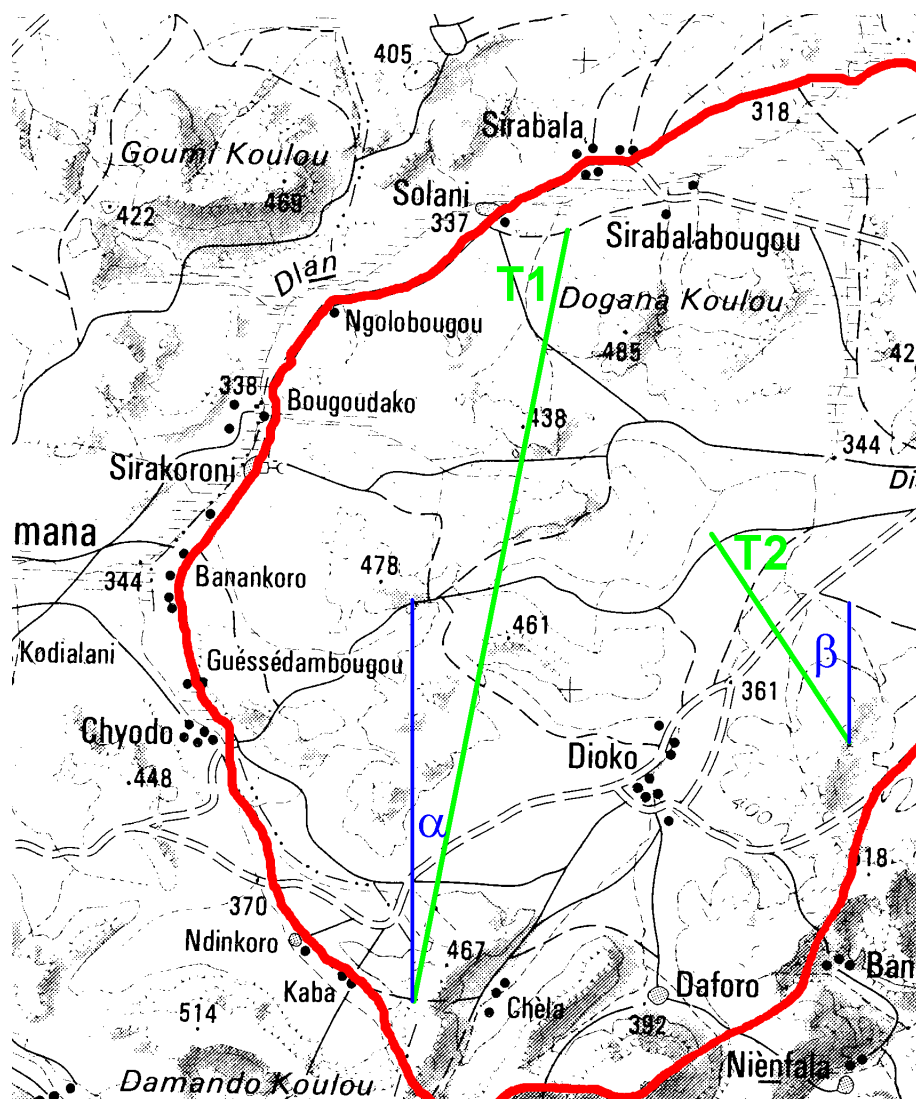


FIG. 1.3 – Massif forestier autour du village de Dioko, commune de Tienfala, cercle de Koulikoro, région de Koulikoro au Mali : les limites du massif sont en rouge, les transects planifiés sont en vert. Transect T1 : 5 km de long et azimuth $\alpha = 13^\circ$; transect T2 : 2 km de long et azimuth de $\beta = -38^\circ$. Le fond de carte est un agrandissement de la carte au 1:200 000 n° ND-29-V intitulée « Bamako-est », éditée par l'IGN, Paris et la DNCT, Bamako (2^{de} édition de 1986). La zone représentée est située entre $7^\circ 45'$ et $7^\circ 53'$ de longitude ouest et $12^\circ 47'$ et $12^\circ 57'$ de latitude nord.

essentiellement de plateaux cuirassés. Sur ces plateaux, les formations ligneuses répondant à des facteurs écologiques bien identifiés tels que la quantité de pluie et la pente du terrain s'organisent en des structures originales : les brousses tigrées. Le degré d'organisation des brousses tigrées varie selon le gradient pluviométrique. Ces variations vont d'un faciès structuré dans les plateaux du nord Niger à un faciès diffus dans la zone sud en passant par un faciès de végétation à organisation intermédiaire ou persillée.

La dégradation accentuée des peuplements savanicoles serait à l'origine des formations contractées qui laissent apparaître souvent de larges clairières. Quand le système de pente est multidirectionnel, ces espaces vides recueillent des eaux de pluie qui ne sont que très peu utilisées par les racines des végétaux. C'est le cas du faciès diffus. Par contre, dès que la pente devient plus forte et va dans une seule direction, on a un fonctionnement hydrique et biologique favorable qui s'installe. Quand la pente longitudinale est régulière et va dans un seul sens, on a une organisation en bandes perpendiculaires à la pente. Le système devient structuré de façon linéaire (brousse tigrée). Les zones nues et végétalisées se présentent alors perpendiculairement à cette pente. La végétation s'est « contractée » ou « agrégée » pour faire face au déficit de pluie. Les zones nues ne sont pas des espaces perdus ; elles servent d'impluvium et permettent l'alimentation et la croissance des espèces végétales dans les bandes boisées.

Dans la bande de végétation se situant immédiatement en aval de cet espace nu, on a donc des conditions écologiques particulières pour que la végétation s'installe en commençant par un front pionnier caractérisé par les espèces ligneuses pionnières et une présence de graminées. Ensuite, vient un « cœur de fourré » qui fonctionne avec l'eau qu'il reçoit directement en plus des eaux d'écoulement par transfert latéral, ce qui justifie le développement important de la végétation. Enfin, vient la zone de sénescence du bouquet qui ne trouve plus assez d'eau pour vivre. Entre les faciès linéaires et les faciès diffus existent les faciès intermédiaires.

1.7.2 Type d'inventaire

Les formations contractées correspondent ainsi à une structuration spatiale fortement anisotrope de la végétation (c'est-à-dire que toutes les directions de l'espace ne sont pas équivalentes). Cette caractéristique fait que le modèle développé précédemment pour calculer le coefficient de variation du nombre de tiges n'est plus rigoureusement valable. Dans le cas des formations contractées, nous recommandons donc de revenir à un type d'inventaire « classique » basé sur des placettes rectangulaire de 20×50 m, soit $1\,000\text{ m}^2$. Pour faire face à l'anisotropie de la répartition spatiale des arbres, le grand

côté du rectangle devra être perpendiculaire aux bandes de végétation (figure 1.4).

Si l'on s'en tient à un coefficient de variation de l'ordre de 60 % pour des parcelles de cette taille, il faut mettre en place environ 150 placettes pour arriver à une précision de 10 % et environ 40 placettes pour arriver à une précision de 20 % (tableau 1.3).

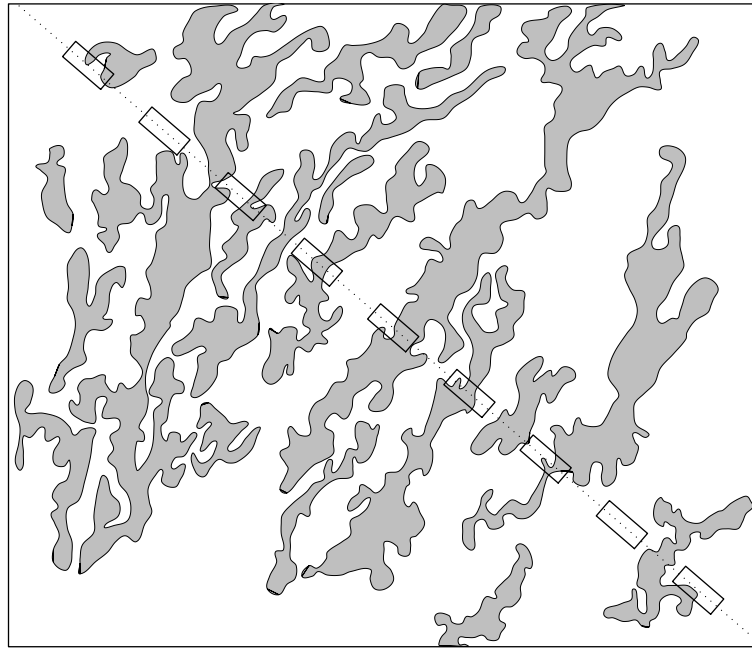


FIG. 1.4 – *Placement du transect perpendiculaire à la direction des bandes de végétation dans le cas des brousses tigrées. Les zones grisées représentent les bandes de végétation. La ligne pointillée représente le transect, tandis que les rectangles sont les placettes d'inventaire. Illustration adaptée de Mengin-Lecreulx & Chabanaud (1986).*

Chapitre 2

Exécution de l'inventaire forestier

Ce chapitre traite de l'exécution sur le terrain de l'inventaire tel qu'il a été planifié lors de l'étape précédente.

2.1 Besoins humains et matériels

2.1.1 Équipe d'inventaire

La mise en place et la mesure de placettes circulaires de 5 m de rayon n'exige que des équipes de 4 personnes, composées de la façon suivante :

- 2 compteurs qui implantent l'unité et mesurent les circonférences,
- 1 pointeur qui consigne toutes les mentions dictées par les compteurs après les avoir répétées à haute voix,
- 1 éclaireur provenant du village qui veille sur les limites du domaine identifié par les populations.

2.1.2 Matériel

Le matériel nécessaire pour effectuer l'inventaire est :

- une boussole et un topofil, ou alors un GPS, pour cheminer d'un point d'inventaire à l'autre ;
- un cordeau décamétrique pour délimiter le rayon des placettes d'inventaire ;
- des rubans de couturier plus éventuellement des compas finlandais pour la mensuration de la grosseur des arbres (autant d'unités qu'il y a de compteurs dans l'équipe) ;
- des fiches d'inventaire et des crayons pour la consignation des données collectées sur les arbres ;

- un plan de la zone à inventorier avec les limites du massif, le tracé des layons, les positions des points d’inventaire et tout élément permettant de s’orienter (tracé des pistes, emplacement des villages, points remarquables, topographie...);
- un tableau avec les coordonnées géographiques (longitude, latitude) des points d’inventaire.

Si on prévoit un cheminement au GPS, il faut s’assurer également que les coordonnées géographiques des points d’inventaire ont été chargées dans la mémoire du GPS.

Le tableau 2.1 montre un exemple indicatif de fiches d’inventaire. Une partie de la fiche est relatif à la description du milieu autour du point d’inventaire. Les variables à collecter pour décrire le milieu sont à moduler en fonction des besoins. Le tableau principal est un tableau de comptage du nombre de rejets, de pied et de tiges par espèce, par classe de circonférence (pour les tiges) et par état (mort ou vivant). Les espèces dominantes peuvent être écrites à l’avance dans la fiche d’inventaire (comme nous l’avons fait dans la fiche exemplaire) si elles sont connues. Sinon on laissera le champ « Espèce » vierge. Il faut de toute façon prévoir des lignes avec le champ « Espèce » vierge pour les espèces non dominantes.

Dans la perspective d’un inventaire rapide des ressources en bois énergie, la fiche d’inventaire peut être simplifiée de la façon suivante : on ne décompte pas les pousses et rejets (troisième colonne du tableau de comptage de la fiche 2.1) ; on ne distingue pas les espèces, mais simplement deux groupes d’espèces : les essences pouvant faire l’objet de bois énergie, et les autres essences, non combustibles (que ce soit pour des raisons technologiques, comme *Bombax costatum*, *Sterculia setigera*, *Lannea velutina*, etc., ou pour des raisons culturelles, comme *Combretum velutinum*, *Gardenia sp.*, etc.). Le tableau de comptage de la fiche 2.1 ne comporte alors plus que deux lignes correspondant à ces deux groupes d’espèces.

2.2 Cheminement sur le terrain

Le cheminement d’un point d’inventaire à l’autre peut se faire à l’aide d’un GPS ou d’une boussole.

2.2.1 Navigation au GPS

Le GPS offre une plus grande souplesse de cheminement mais suppose que le chef d’équipe d’inventaire soit formé à son utilisation. Même les GPS bas de gamme d’aujourd’hui permettent de stocker en mémoire des coordonnées

TAB. 2.1 – Exemple de fiche d'inventaire.

Forêt : Date : Placette n°										Feuillet : / Pointeur : Layon n°									
Description du milieu																			
Altitude : Faciès : Situation topographique : <input type="checkbox"/> plateau <input type="checkbox"/> pente <input type="checkbox"/> haut de pente <input type="checkbox"/> plaine <input type="checkbox"/> bas de pente										Pente moyenne (%) : Taux de recouvrement (%) : Nombre de souches coupées :									
Comptage des pieds et des tiges																			
Espèce	État	Nb. rejets	Nb. pieds	Nombre de tiges par classe de circonférence															
				10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	100-109	110-119	120-129	130-139	≥ 140		
<i>Acacia ataxacantha</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Boscia senegalensis</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Boscia angustifolia</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Combretum glutinosum</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Combretum micranthum</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Dichrostachys cinerea</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Guiera senegalensis</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Piliostigma reticulatum</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Acacia nilotica</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Acacia senegal</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	vivant																		
	mort																		
<i>Balanites aegyptiaca</i>	vivant																		
	mort																		
	vivant																		
	mort																		
	vivant																		
	mort																		

de points et proposent une fonction pour atteindre un point de coordonnées connues. Il suffit alors de mettre en mémoire au préalable les coordonnées de tous les points d'inventaire. Pour atteindre un point d'inventaire, il suffit ensuite de le sélectionner dans le GPS et d'utiliser la fonction « atteindre un point ». Le GPS indique alors la direction à suivre et la distance restant à parcourir. Lorsque cette distance est nulle, le point d'inventaire est atteint. On peut ainsi cheminer de proche en proche sur chacun des points d'inventaire. L'avantage de cette méthode est qu'il n'est pas nécessaire de suivre des transects, et qu'on peut pratiquement se passer de points de repère.

2.2.2 Navigation à la boussole

La navigation à la boussole requiert un moindre niveau de technicité mais suppose que l'on chemine le long de transects linéaires. Il faut tout d'abord trouver le point de départ du transect ; la procédure pour cela est la suivante :

- repérer un point caractéristique sur la carte et facile à retrouver sur le terrain : intersection de routes, pont, élément saillant de relief, etc.
- joindre ce point caractéristique au point de départ du transect ; soit Δ ce segment ;
- noter l'azimut θ de Δ , c'est-à-dire l'angle entre Δ et le nord magnétique ;
- noter la longueur ℓ de Δ : mesurer la longueur de Δ sur la carte et utiliser l'échelle pour obtenir sa longueur correspondante sur le terrain.

Une fois sur le terrain, il suffit de se rendre au point caractéristique identifié et de suivre l'azimut θ sur une distance ℓ . L'azimut est donné par la boussole. La distance est donnée par le topofil. Il est également possible d'utiliser un pas étalonné plutôt que le topofil pour mesurer la distance. Pour cela, faire 20 pas normaux en ligne droite et mesurer à l'aide du cordeau décamétrique la distance d parcourue. Le nombre n de pas à faire pour parcourir la distance ℓ s'obtient alors par une règle de trois : $n = 20 \ell / d$.

Par la suite, le cheminement d'un point d'inventaire au suivant le long du transect s'effectue selon le même principe :

- noter l'azimut α du transect (cf. figure 1.3) et la distance l entre deux points d'inventaire successifs sur le transect ;
- une fois sur le terrain, suivre l'azimut α (indiqué par la boussole) sur une distance l (indiqué par le topofil ou le pas étalonné) pour passer d'un point d'inventaire au suivant.

2.3 Implantation des placettes

Arrivé sur un point d'inventaire, un des compteurs se met au centre et prend une extrémité du cordeau dont la longueur est ajustée au rayon de la placette d'inventaire (5 m dans le cas présent). L'autre compteur prend l'autre extrémité du cordeau et fait le tour de la placette en maintenant le cordeau tendu. Les limites de la placette sont balisées à l'aide de « voyants » (branche, feuille blanche, ruban de type toposignal...) et les ligneux contenus dans la placette circulaire sont repérés. On prendra garde à bien repérer les individus proches de la limite et dont l'inclusion dans la placette n'est pas évidente au premier coup d'œil.

Les individus sur la limite de la placette seront traités comme suit (figure 2.1) : un arbre avec un fût bien distinct sera considéré à l'intérieur de la placette si plus de la moitié de son tronc à la base se trouve dans la placette (figure 2.1a) ; une cépée à cheval sur la limite de la placette sera considérée à l'intérieur dans la moitié est de la placette et à l'extérieur dans la moitié ouest de la placette. Toutes les tiges d'une cépée à cheval sur la limite mais considérée à l'intérieur seront inventoriées, y compris les tiges apparemment à l'extérieur de la placette (figure 2.1b).

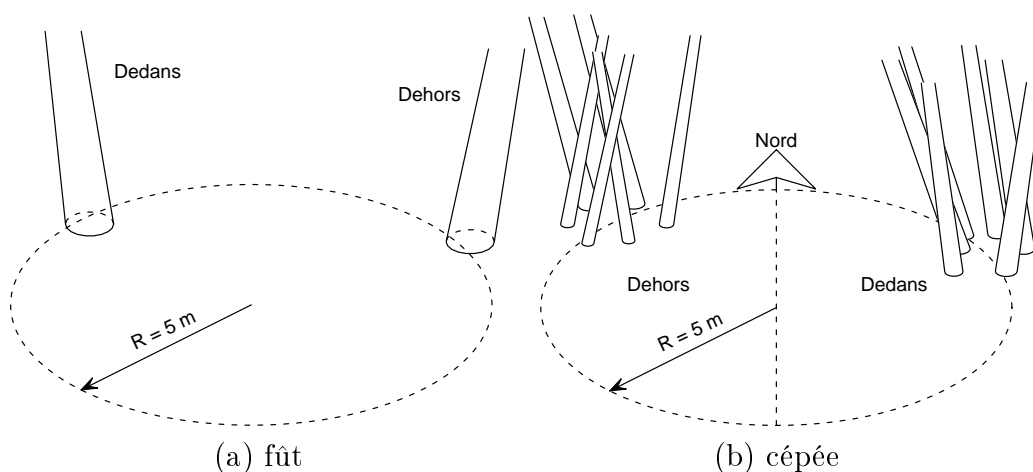


FIG. 2.1 – Règle de décision de l'inclusion ou l'exclusion de la placette d'inventaire d'un fût (a) ou d'une cépée (b).

Une fois la délimitation de la placette faite, les deux compteurs parcourent chacun une moitié de placette et annonce les mesures au pointeur. Les arbres sont flashés (toujours du même côté) au fur et à mesure qu'ils sont mesurés, pour éviter les oublis et les doubles comptages. Dans la mesure où la placette est de petite taille, ces erreurs sont assez faciles à éviter. Le pointeur note les

mesures et contrôle que les compteurs ne vont pas au-delà des limites de la placette d'inventaire.

2.4 Mesures

2.4.1 Individus concernés

Les mesures portent sur tous les individus ayant une taille suffisante pour faire l'objet de bois énergie. Il s'agit des fûts ayant une circonférence à 1 m 30 supérieure à 10 cm, et des cépées ayant au moins une tige de circonférence à 1 m 30 supérieure à 10 cm. Toutes les essences sont concernées, bois vivant comme bois mort. Les essences non combustibles seront quand même inventoriées dans un souci de connaître le potentiel ligneux du domaine à aménager.

2.4.2 Mesure de la grosseur

La grosseur de chaque tige de plus de 10 cm de circonférence à 1 m 30 est mesurée. Les tiges de grosseur inférieure sont ignorées. On réalise en fait un comptage du nombre de tiges par essence et par classe de circonférence. Il s'agit donc de déterminer à quelle classe de circonférence appartient chaque tige. Cela peut être fait à l'aide d'un ruban de couturier (mesure de la circonférence) ou à l'aide d'un compas finlandais gradué en classes de circonférence (mesure directe de la classe de circonférence ; figure 2.2). L'utilisation du compas finlandais s'avère simple et les mesures sont effectuées beaucoup plus rapidement qu'avec un ruban. Cependant l'utilisation de cet instrument est limité aux plus petites classes de circonférence (qui sont aussi les plus fréquentes) ; il faut ensuite passer au ruban pour les individus les plus gros. Les circonférences sont mesurées à 1 m 30 de hauteur.

La définition des classes de circonférence est liée à l'utilisation d'un tarif de peuplement, qui sera utilisé lors du dépouillement des données pour estimer le volume sur pied. Le tarif que nous recommandons d'utiliser est fondé sur un découpage en quatorze classes de circonférence à 1 m 30 :

- classe 1 : de 10 à 19 cm de circonférence à 1 m 30 ;
- classe 2 : de 20 à 29 cm de circonférence à 1 m 30 ;
- ...
- classe i : de $10i$ à $10i + 9$ cm de circonférence à 1 m 30 ;
- ...
- classe 13 : de 130 à 139 cm de circonférence à 1 m 30 ;
- classe 14 : plus de 140 cm de circonférence à 1 m 30.

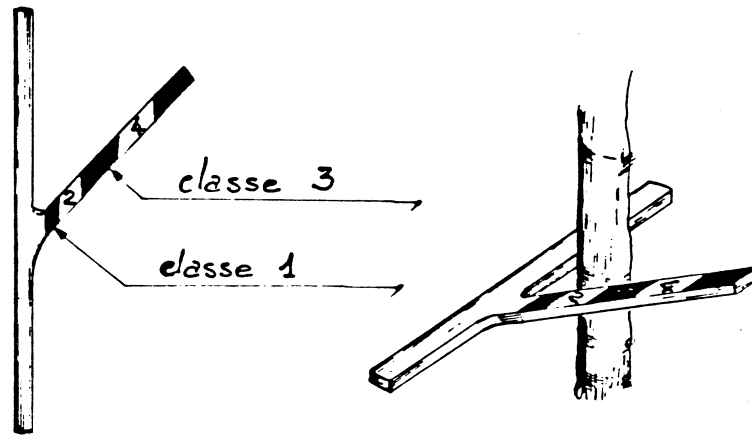


FIG. 2.2 – *Compas de type finlandais. Illustration tirée de Mengin-Lecreulx & Chabanaud (1986).*

2.4.3 Dialogue compteur–pointeur

Le compteur annonce l'essence et l'état (vivant ou mort) de chaque pied, ainsi que la classe de circonférence et l'état (vivant ou mort) de chaque tige qu'il mesure. Le pointeur répète chacune des annonces. Par exemple si le compteur arrive devant un pied multicaule de *Combretum micranthum*, il annonce : « *Combretum micranthum*, vivant » (au moins une tige est vivant, donc le pied est vivant). Le pointeur répète : « *Combretum micranthum*, vivant », et il note sur la fiche d'inventaire. Le compteur détaille alors chacune des tiges qui composent le pied :

« Classe 1, vivant. » Le pointeur répète et note.

« Classe 2, mort. » Le pointeur répète et note.

« Classe 1, mort. » Le pointeur répète et note.

« Terminé. » (une fois que toutes les tiges ont été passées en revue).

Le pointeur peut utiliser le système suivant pour noter les comptes :

•	• •	• •	• •	• •	• •	• •	• •	• •	• •	• •	Etc.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Chapitre 3

Traitement des données d'inventaire

La phase de traitement des données d'inventaire inclut tout le travail qui est fait à partir des fiches de terrain remplies. Elle comporte la saisie des données, l'apurement des données, la mise en forme des données, et le calcul du volume à l'hectare.

3.1 Saisie des données

La saisie consiste à transférer dans un fichier informatique les données présentes sur les fiches de terrain. Il faut au préalable avoir choisi un logiciel. Dans l'optique d'un inventaire rapide de la ressource en bois, un tableur comme Microsoft Excel pourra faire l'affaire. Pour des inventaires plus conséquents, il faudra passer à un logiciel de gestion de base de données, comme par exemple Microsoft Access.

3.1.1 Les erreurs de saisie

La saisie doit être faite aussi soigneusement que possible pour limiter les erreurs de saisie. Une façon de minimiser les erreurs de saisie est de faire une double saisie : un premier opérateur fait la saisie ; un deuxième opérateur (si possible différent du premier) refait la saisie de manière totalement indépendante du premier. Il suffit alors de comparer les deux fichiers de saisie pour déceler les erreurs de saisie. Comme il peut probable que deux opérateurs fassent la même erreur de saisie, cette méthode assure une bonne qualité de la saisie. En revanche elle est coûteuse en temps et fastidieuse.

Lors de la saisie des données, il faut également s'attacher à un certains

nombre de détails qui ont leur importance. Il faut d'abord avoir bien en tête que pour le logiciel de statistiques qui traitera ensuite les données, un nombre n'a pas le même rôle qu'une chaîne de caractères. Un nombre sera interprété comme la valeur d'une variable numérique, tandis qu'une chaîne de caractère sera interprétée comme la modalité d'une variable qualitative. La différence entre les deux est en général bien claire, mais pas toujours. Prenons le cas des latitudes et des longitudes. Si on a en tête de calculer la corrélation entre la latitude ou la longitude et une autre variable (pour identifier un gradient nord-sud ou est-ouest), il faut faire en sorte que le logiciel perçoive les coordonnées géographiques comme des nombres. Il ne faut donc surtout pas saisir quelque chose comme « 7°28'55.1" » ou « 13°41'25.9" ». Ces coordonnées seraient interprétées comme des variables qualitatives, et aucun calcul ne serait alors possible. Une solution consiste à convertir les coordonnées géographiques en valeurs décimales. Une autre solution consiste à saisir les coordonnées géographiques sur trois colonnes (une colonne pour les degrés, une autre pour les minutes, une troisième pour les secondes).

Lorsque l'on saisit des variables qualitatives, il faut éviter de saisir des chaînes de caractères de grande longueur car cela multiplie des risques d'erreur de saisie. Il faut mieux saisir un code abrégé et préciser dans la meta-information (cf. ci-dessous) la signification de ce code.

Un autre détail qui a son importance est le symbole décimal utilisé. Pratiquement tous les logiciels de statistique permettent de basculer de la virgule (symbole utilisé en français) au point (symbole utilisé en anglais), donc l'usage de l'un ou de l'autre est indifférent. En revanche, une fois que l'on a choisi la virgule ou le point comme symbole décimal, il faut s'y tenir dans l'ensemble de la saisie. Si on utilise tantôt l'un, tantôt l'autre, une partie des données normalement numériques seront interprétés par le logiciel de statistiques comme des chaînes de caractères.

3.1.2 La meta-information

Au cours de la saisie des données, il faut songer à la meta-information. La meta-information est l'information qui accompagne les données, sans être elle-même une donnée mesurée. La meta-information donnera par exemple la date à laquelle les mesures ont été effectuées, et par qui. Si des codes sont utilisés dans la saisie, la meta-information précisera la signification de ces codes. Il n'est pas rare par exemple que les noms des espèces soient saisis en abrégé. Un code espèce comme ANO est ambiguë : il peut s'agir d'*Annona senegalensis* ou d'*Anogeissus leiocarpus*. La meta-information est là pour lever cette ambiguïté. La meta-information doit aussi préciser la nature des variables mesurées. Par exemple si on mesure les circonférences d'arbres,

noter « circonférence » dans le tableau de données est en soi insuffisant. La meta-information doit préciser à quelle hauteur la circonférence a été mesurée (à la base, à 20 cm, à 1 m 30...) et, chose extrêmement importante, dans quelle unité la circonférence est exprimée (en cm, en dm...) Insistons sur le fait que les unités de mesure de chacune des variables doit être précisées dans la meta-information. Trop souvent on a des tableaux de données dont on ne sait pas en quelles unités elles sont exprimées, ce qui donne alors lieu à un jeu de devinettes risqué.

Pour la personne qui a conçu le dispositif de mesure et encadré les mesures, les informations contenues dans la meta-information sont souvent si évidentes qu'elle ne voit pas la nécessité de passer du temps à les renseigner. Il faut cependant s'imaginer une personne étrangère à la mesure retrouvant le jeu de données dans 10 ans. Si la meta-information a été bien faite, cette personne doit pouvoir travailler sur le jeu de données comme si elle l'avait constitué elle-même.

3.1.3 Niveaux emboîtés

Les données sont saisies dans des tableaux, avec une ligne par individu. Si les données comportent plusieurs niveaux emboîtés, il doit y avoir autant de tableaux qu'il y a de niveaux. Prenons l'exemple de forêts villageoises inventoriées avec des placettes. Sur chaque placette, on compte le nombre de tiges par essence et par classe de circonférence. Il y a dans ce cas trois niveaux emboîtés : la forêt villageoise, qui comporte plusieurs placettes ; la placette, qui comporte plusieurs essences ; l'essence, qui comporte un décompte du nombre de tiges par classe de circonférence. Il devra donc y avoir dans ce cas trois tableaux de données (figure 3.1). Chaque tableau renseignera les variables décrivant les individus du niveau correspondant, avec une ligne de tableau par individu. Par exemple le premier tableau donnera la superficie de chacune des forêts villageoises. Le deuxième tableau donnera les coordonnées géographiques de chacune des placettes d'inventaire. Le troisième tableau donnera le nombre de tiges par classe de circonférence pour chaque essence. À chaque ligne d'un tableau correspond plusieurs lignes dans le tableau du niveau inférieur. Un identifiant doit permettre de faire la correspondance entre les lignes des différents tableaux. Ainsi le numéro du village sera répété dans les tableaux « forêt » et « placette », et le numéro de la placette sera répété dans les tableaux « placette » et « essence » (figure 3.1).

Cette structuration des données minimisent la répétition de l'information, donc les erreurs de saisie. Une alternative consisterait à saisir toutes les données dans le même tableau, comme indiqué pour l'exemple précédent dans le tableau 3.1. Cette alternative est mauvaise car elle répète inutilement de

Table « forêt »		Table « placette »			
village	superficie	village	placette	longitude	latitude
1	400	1	1.1	7.345	12.146
2	650	1	1.2	7.832	12.253
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Table « essence »							
placette	arbre	espèce	classe 1	classe 2	...	classe 13	classe 14
1.1	1.1.1	ANO	10	8	...	0	2
1.1	1.1.2	GUI	23	12	...	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

FIG. 3.1 – *Exemple de trois tableaux de données pour trois niveaux emboîtés.*

TAB. 3.1 – *Saisie des données avec trois niveaux emboîtés dans un seul tableau.*

village	superficie	placette	longitude	latitude	arbre	espèce	classe 1	classe 2	...	classe 14
1	400	1.1	7.345	12.146	1.1.1	ANO	10	8	...	2
1	401	1.1	7.345	12.146	1.1.2	GUI	23	12	...	0
1	400	1.2	7.832	12.253	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2	650	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

l'information, donc multiplie les risques d'erreur de saisie. Par exemple dans le tableau 3.1 nous avons volontairement introduit une erreur de saisie dans la deuxième ligne du tableau, où la superficie de la forêt du village 1, normalement égale à 400 ha, est ici de 401 ha. En répétant inutilement de l'information, on se retrouve avec une multiplication de ce genre d'incohérences qu'il faut ensuite corriger.

Une bonne façon de résoudre ces problèmes de niveaux emboîtés est de construire une base de données relationnelle. Les bases de données relationnelles sont précisément faites pour gérer différents tableaux avec des liens entre eux. Elles permettent d'éliminer toute incohérence comme celle illustrée dans le tableau 3.1 en vérifiant systématiquement l'intégrité des relations entre les tableaux. Cependant la construction d'une base de données relationnelles est quelque chose de technique et il faut éventuellement avoir recours à une personne compétente dans ce domaine.

3.2 Apurement des données

L'apurement nécessite un aller-retour entre les fiches de mesure et le logiciel de statistiques (ou éventuellement un logiciel d'apurement des données spécialement conçu pour cela). Cette étape vise à éliminer toute incohérence dans les données. Éventuellement, si le dispositif de mesure est encore en place, elle nécessitera de refaire certaines mesures. L'apurement permettra d'éliminer :

- les données aberrantes. Par exemple un arbre de 50 mètres de diamètre.
- les données incohérentes. Par exemple une essence présente sur une placette d'inventaire avec 3 tiges et 10 pieds (les pieds étant potentiellement multicaules, il y a forcément plus de tiges que de pieds).
- les fausses modalités des variables qualitatives. Par exemple un logiciel sensible à la casse interprétera « oui » et « Oui » comme deux modalités différentes, alors qu'il s'agit de la même modalité.

La difficulté pour repérer les données aberrantes vient du choix du seuil entre ce qui est une mesure normale et ce qui est une mesure aberrante. Les données incohérentes sont plus difficiles à repérer car elles nécessitent de confronter plusieurs variables entre elles. Dans l'exemple précédent, une essence présente avec 3 tiges n'a rien d'anormal et la présence de 10 pieds n'a rien d'anormal non plus, mais bien entendu les deux mesures ne peuvent pas être correctes simultanément pour la même placette d'inventaire.

3.3 Mise en forme des données

La mise en forme consiste à présenter les données sous une forme sous laquelle les calculs nécessaires à l'estimation du volume sur pied seront exécutables. Dans le cas présent, il s'agira de passer des données telles qu'elles ont été saisies à quatre tableaux. Si N est le nombre de placettes inventoriées, le premier de ces tableaux est un tableau à N lignes et 14 colonnes donnant, pour chaque placette en ligne et pour classe de circonférence en colonne, le nombre de tiges vivantes d'essences propices au bois de feu. Un exemple d'un tel tableau est donné par le tableau 3.3. Le second tableau a la même structure que le premier mais contient les effectifs des tiges mortes des essences propices au bois de feu. Le troisième tableau contient les effectifs des tiges vivantes des essences non combustibles. Et enfin le quatrième tableau contient les effectifs des tiges mortes des essences non combustibles.

La structuration des données sous cette forme sera d'autant plus aisée que la saisie des données aura été effectuée dans un format adéquat. Les bases de données relationnelles ont l'avantage d'offrir un langage de requêtes qui permet de construire facilement de tels tableaux synthétiques. Dans le tableur Microsoft Excel, la notion de « tableau croisé dynamique » sera utilement mise à profit pour mettre en forme les données.

On suppose désormais que l'on dispose sur un support informatique des quatre tableaux N lignes \times 14 colonnes donnant le nombre de tiges par classe de circonférence (en colonne) et par placette (en ligne).

3.4 Tarif de cubage

La formule permettant de passer des effectifs par classe de circonférence au volume est un tarif de cubage. Plus spécifiquement il s'agit d'un tarif de peuplement, dans la mesure où les variables d'entrée du tarif sont des caractéristiques du peuplement. Il existe de nombreux tarifs de cubage pour les formations arborées sèches d'Afrique de l'ouest. L'annexe B en récapitule quelques-uns (sans prétention à l'exhaustivité), que ce soient des tarifs de peuplement ou individuels, spécifiques à une espèce ou non.

Le tarif que nous recommandons est le tarif de peuplement toutes essences confondues établi par la Stratégie Énergie Domestique du Mali (Nouvellet, 2002; Sylla, 2000). Le volume V en m^3 est donné par la formule :

$$V = \sum_{i=1}^{14} a_{ip} n_i$$

où n_i est le nombre de tiges dans la classe de circonférence i , et les a_{ip} sont

TAB. 3.2 – *Coefficients donnant le volume moyen d’une tige par classes de circonférence à 1 m 30, en fonction de la pluviométrie.*

Classe	C_{\min} cm	C_{\max} cm	Pluviométrie (mm an ⁻¹)			
			300–500	500-800	800–1100	> 1100
1	10	19	0.002	0.002	0.002	0.003
2	20	29	0.007	0.008	0.009	0.011
3	30	39	0.009	0.022	0.032	0.037
4	40	49	0.027	0.029	0.071	0.083
5	50	59	0.045	0.065	0.106	0.114
6	60	69	0.094	0.115	0.158	0.243
7	70	79	0.156	0.230	0.254	0.469
8	80	89	0.192	0.298	0.380	0.583
9	90	99	0.265	0.360	0.518	0.710
10	100	109	0.306	0.580	0.706	1.086
11	110	119	0.551	0.773	0.904	1.243
12	120	129	0.718	0.976	1.246	1.348
13	130	139	0.773	1.094	1.493	1.579
14	140	∞	1.181	1.694	1.935	2.495

des coefficients qui dépendent à la fois de la classe de circonférence i et de la pluviométrie p de la zone. Les classes de circonférences sont les 14 classes précédemment définies, pour des circonférences mesurées à 1 m 30 de hauteur. Les valeurs des coefficients a_{ip} sont données dans le tableau 3.2.

3.5 Estimation du volume de bois

3.5.1 Moyenne

Partons d’un tableau à N lignes et 14 colonnes donnant le nombre de tiges par classe de circonférence en colonne et par placette en ligne (qu’ils s’agissent du bois vivant ou mort, des essences combustibles ou non). Soit n_{ij} l’élément de la j^{e} ligne et i^{e} colonne de ce tableau, c’est-à-dire l’effectif de tiges dans la classe de circonférence i pour la placette j . Soit V_{ij} le volume de bois de la classe de circonférence i dans la placette j ; il est calculé selon :

$$V_{ij} = a_{ip} n_{ij}$$

où le coefficient a_{ip} est donné dans le tableau 3.2 (en choisissant la bonne classe de pluviométrie). Le volume total de bois V_j dans la j^{e} placette s’ob-

tient en additionnant les 14 classes de circonférence :

$$V_j = V_{1j} + V_{2j} + \dots + V_{14j}$$

On obtient un échantillon de taille N de valeurs de V_j . Le volume moyen par placette vaut :

$$V_m = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N}$$

et le volume par unité de surface vaut :

$$V_s = \frac{V_m}{S}$$

où S est la surface d'une placette. Dans le cas de placettes circulaires de rayon 5 m, $S = \pi \times 25 = 78.5 \text{ m}^2$. Si S est exprimée en m^2 , V_s s'exprime en m^3 (de bois) par m^2 (de surface de terrain). Il faut multiplier cette valeur par 10 000 pour arriver à une expression du volume de bois en m^3 par hectare.

3.5.2 Intervalle de confiance

L'estimation du volume de bois par hectare (en moyenne) *doit* être complétée par le calcul de l'intervalle de confiance sur cette estimation, qui permet de savoir *a posteriori* la précision atteinte par l'inventaire. On commence par calculer la variance empirique S_V du volume de bois par placette :

$$S_V = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (V_j - V_m)^2 = \frac{(V_1 - V_m)^2 + \dots + (V_N - V_m)^2}{N-1}$$

puis son écart-type empirique $\hat{\sigma}$:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{S_V}$$

L'intervalle de confiance au seuil α (typiquement 5 %) de l'estimation du volume de bois par unité de surface est alors :

$$V_s \pm \frac{t_{N-1;\alpha/2}}{\sqrt{N-1}} \frac{\hat{\sigma}}{S}$$

où $t_{N-1;\alpha/2}$ est, rappelons-le, le $\alpha/2$ -quantile d'une loi de Student à $N-1$ degrés de liberté. La précision de l'estimation (au seuil α) est :

$$\varepsilon = \frac{t_{N-1;\alpha/2}}{\sqrt{N-1}} \frac{\hat{\sigma}}{V_s S}$$

Ce calcul permet de se rendre compte si l'objectif qu'on s'était fixé en termes de précision ε à atteindre (10 %, 20 %...) a bien été atteint. Si la précision obtenue est trop inférieure à l'objectif fixé, il faut compléter le dispositif d'inventaire par de nouvelles placettes.

3.5.3 Destination du peuplement

Le volume de bois par hectare est calculé séparément pour le bois mort et le bois vivant, et pour les essences combustibles et les essences non combustibles. Pour décider de la destination du peuplement, il faut réaliser une distinction supplémentaire entre le bois utilisable pour la carbonisation et celui qui ne l'est pas. Est considéré comme bois utilisable pour la carbonisation toutes les tiges des essences combustibles de circonférence à 1 m 30 supérieure à 20 cm (soit les classes 2 à 14). On répétera donc le calcul du volume de bois par hectare pour les essences combustibles en éliminant la classe de circonférence 1 afin d'obtenir le volume de bois carbonisable par hectare.

Soit V_{feu} le volume de bois vivant par hectare des essences combustibles, V_{feu}^{\dagger} le volume de bois mort par hectare des essences combustibles, V_{carbo} le volume de bois vivant carbonisable par hectare, et $V_{\text{carbo}}^{\dagger}$ le volume de bois mort carbonisable par hectare. Une règle empirique pour destiner de la destination du peuplement est la suivante :

- si $V_{\text{carbo}} + V_{\text{carbo}}^{\dagger} \geq 15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, le site peut être retenu comme zone de prélèvement de bois pour la carbonisation ;
- si $V_{\text{carbo}} + V_{\text{carbo}}^{\dagger} < 15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ et $V_{\text{feu}} + V_{\text{feu}}^{\dagger} \geq 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, le site peut être retenu comme zone de prélèvement de bois de feu.

3.6 Exemple

Tous les calculs que nous avons détaillés dans ce chapitre peuvent être réalisés avec un tableur comme Microsoft Excel, même si nous déconseillons l'utilisation de ce logiciel pour faire des calculs statistiques car ses fonctions statistiques contiennent des erreurs. À titre d'exemple, nous détaillons les calculs pour les tableaux 3.3 et 3.4, qui donnent les effectifs de tiges par classe de circonférence dans 32 placettes d'inventaire, en distinguant le bois vivant (tableau 3.3) du bois mort (tableau 3.4).

Les résultats sont donnés dans le tableau 3.5. La pluviométrie du site inventorié est comprise dans l'intervalle 500–800 mm par an. On utilise donc pour le tarif de cubage les 14 coefficients donnés dans la cinquième colonne du tableau 3.2. En multipliant chaque ligne du tableau 3.3 par ces 14 coefficients et en sommant sur les colonnes, on obtient le volume de bois vivant dans chacune des 32 placettes d'inventaire. Ces volumes sont donnés dans la deuxième colonne du tableau 3.5. De même en multipliant chaque ligne du tableau 3.4 par les 14 coefficients du tarif de cubage et en sommant sur les colonnes, on obtient le volume de bois mort dans chacune des 32 placettes

TAB. 3.3 – *Effectif de tiges vivantes par classe circonférence dans 32 placettes d'inventaire.*

Placette	Classe de circonférence													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	25	22	5	1	0	5	0	0	0	1	0	0	0	1
2	40	28	2	3	6	1	4	2	0	0	1	1	0	0
3	100	33	17	5	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0
4	18	5	4	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	31	17	5	3	1	6	1	0	0	0	0	0	0	0
6	16	11	7	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7	42	13	3	1	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0
8	77	29	19	7	5	2	0	0	0	0	1	0	0	0
9	15	13	7	5	5	0	4	0	3	0	0	0	0	0
10	61	15	7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
11	60	6	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1
12	28	9	8	2	1	0	2	2	0	1	0	0	0	0
13	42	12	0	3	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
14	37	13	8	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
15	36	12	2	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
16	35	8	3	6	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0
17	65	27	9	0	3	0	0	1	0	1	0	0	0	0
18	28	9	7	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
19	60	28	20	7	7	2	3	0	0	1	0	1	0	0
20	90	35	20	10	3	2	1	0	1	1	0	0	0	0
21	28	6	5	2	1	1	2	0	0	2	0	0	0	0
22	32	10	6	6	1	1	3	1	0	0	0	0	0	0
23	14	14	5	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
24	62	30	14	5	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
25	30	10	3	4	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0
26	59	19	7	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
27	51	5	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
28	56	11	4	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
29	57	26	6	2	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0
30	92	30	10	2	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
31	76	18	5	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
32	29	35	19	3	3	1	2	0	0	0	0	0	1	1

TAB. 3.4 – *Effectif de tiges mortes par classe circonférence dans 32 placettes d'inventaire.*

Placette	Classe de circonférence													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TAB. 3.5 – *Estimation du volume de bois (mort ou vivant, gros bois et/ou petit bois).*

Placette	Gros bois + petit bois			Gros bois		
	bois vivant	bois mort	mort + vivant	bois vivant	bois mort	mort + vivant
1	3.214	0.000	3.214	3.164	0.000	3.164
2	4.205	0.016	4.221	4.125	0.016	4.141
3	2.166	0.002	2.168	1.966	0.000	1.966
4	0.626	0.037	0.663	0.590	0.037	0.627
5	1.380	0.000	1.380	1.318	0.000	1.318
6	0.800	0.029	0.829	0.768	0.029	0.797
7	1.619	0.008	1.627	1.535	0.008	1.543
8	2.335	0.014	2.349	2.181	0.008	2.189
9	2.758	0.008	2.766	2.728	0.008	2.736
10	3.299	0.000	3.299	3.177	0.000	3.177
11	2.265	0.000	2.265	2.145	0.000	2.145
12	2.063	0.000	2.063	2.007	0.000	2.007
13	2.419	0.000	2.419	2.335	0.000	2.335
14	0.908	0.000	0.908	0.834	0.000	0.834
15	0.892	0.000	0.892	0.820	0.000	0.820
16	1.017	0.004	1.021	0.947	0.000	0.947
17	1.617	0.000	1.617	1.487	0.000	1.487
18	0.782	0.002	0.784	0.726	0.000	0.726
19	3.918	0.000	3.918	3.798	0.000	3.798
20	2.785	0.000	2.785	2.605	0.000	2.605
21	2.072	0.580	2.652	2.016	0.580	2.596
22	1.618	0.002	1.620	1.554	0.000	1.554
23	0.768	0.002	0.770	0.740	0.000	0.740
24	1.462	0.004	1.466	1.338	0.000	1.338
25	1.446	0.000	1.446	1.386	0.000	1.386
26	0.698	0.002	0.700	0.580	0.000	0.580
27	1.770	0.000	1.770	1.668	0.000	1.668
28	0.720	0.000	0.720	0.608	0.000	0.608
29	1.235	0.000	1.235	1.121	0.000	1.121
30	1.937	0.010	1.947	1.753	0.008	1.761
31	1.626	0.000	1.626	1.474	0.000	1.474
32	4.401	0.000	4.401	4.343	0.000	4.343
V_m (m ³)	1.901	0.022	1.923	1.807	0.022	1.829
$\hat{\sigma}$ (m ³)	1.047	0.102	1.054	1.041	0.102	1.048
V_s (m ³ ha ⁻¹)	15.452	0.183	15.635	14.694	0.176	14.871
CV (%)	55.089	453.767	54.792	57.572	471.444	57.316
i.c. (m ³ ha ⁻¹)	3.118	0.304	3.138	3.099	0.304	3.122
ε (%)	20.180	166.218	20.071	21.089	172.693	20.995

d'inventaire. Ces volumes sont donnés dans la troisième colonne du tableau 3.5. On peut ajouter le volume de bois vivant et le volume de bois mort pour obtenir le volume total de bois dans chacune des 32 placettes (quatrième colonne du tableau 3.5). Enfin ces calculs peuvent être répétés en se limitant au gros bois, c'est-à-dire aux classes de circonférence 2-14 ; les volumes correspondant sont donnés dans les colonnes 5 à 7 du tableau 3.5.

Le volume moyen (V_m) est calculé en prenant la moyenne du volume sur les 32 placettes d'inventaire. Comme le tarif de cubage donne le volume en m^3 , ce volume moyen est estimé également en m^3 . L'écart-type empirique ($\hat{\sigma}$) du volume est calculé également à partir des 32 valeurs du volume obtenues sur les 32 placettes d'inventaire. Il s'exprime de même en m^3 . Le volume surfacique (V_s , en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) se calcule comme le rapport du volume moyen V_m sur la surface unitaire S des placettes d'inventaire. Dans le cas présent, $S = 1230 \text{ m}^2$, soit $0,123 \text{ ha}$. Ainsi le volume total de bois est de $15,64 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ dans cette forêt, dont $0,18 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ de bois mort et $14,87 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ de gros bois.

Le coefficient de variation (CV) se calcule comme le rapport $\hat{\sigma}/V_m$ de l'écart-type empirique du volume sur sa moyenne. On remarquera qu'il est proche de 55 % pour le volume de bois vivant ou pour le volume total de bois (vivant + mort). En revanche le coefficient est très élevé pour le volume de bois mort (supérieur à 450 %). La demi-amplitude de l'intervalle de confiance du volume surfacique, notée ici « i.c. », se calcule selon la formule $t_{N-1;\alpha/2}\hat{\sigma}/(S\sqrt{N-1})$. Ici $N = 32$ placettes d'inventaire. En prenant $\alpha = 5 \%$, on a : $t_{31;0.975} = 2.039513$. Ainsi on peut préciser l'estimation du volume de bois en disant qu'au seuil de 5 %, le volume total de bois est de $15,64 \pm 3,14 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ dans cette forêt, dont $0,18 \pm 0,30 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ de bois mort et $14,87 \pm 3,12 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ de gros bois.

Enfin la précision de l'estimation (ε) se calcule comme le ratio de la demi-amplitude de l'intervalle de confiance (i.c.) par le volume surfacique. Cet inventaire a donc permis d'atteindre une précision d'estimation au seuil de 5 % de l'ordre de 20 % pour le volume total de bois ou pour le volume de bois vivant. Cette précision peut être considérée comme acceptable dans le cadre d'une estimation rapide de la ressource. En revanche le volume de bois mort est estimé avec une précision largement inférieure¹, de l'ordre de 170 %. Cet inventaire aurait donc été inadapté si son objectif avait été simplement d'estimer le volume de bois mort.

1. ε est en fait une *imprécision* d'estimation : plus ε est faible, meilleure est la précision de l'inventaire.

Chapitre 4

Estimation rapide de la productivité

4.1 Rappel de la définition de la productivité

La définition classique de la productivité se réfère à la forêt comme à un stock d'une ressource en bois (figure 4.1). On notera $V(t)$ la valeur de ce stock au temps t . La nature de la ressource peut être variable : il peut s'agir de bois de feu, de bois d'œuvre, de biomasse foliaire, etc. On parlera ainsi de la productivité en bois de feu, en bois d'œuvre, en biomasse foliaire, etc. Les variations temporelles du stock $V(t)$ résultent de flux entrant et sortant. Les flux entrant, comptés positivement, correspondent aux gains par la croissance des arbres et par le recrutement de nouveaux individus au-dessus du diamètre seuil d'inventaire. Les flux sortant, comptés négativement, correspondent aux pertes par mortalité et par exploitation. On notera :

- $c(t)$, le flux entrant dû à la croissance des arbres,
- $r(t)$, le flux entrant dû au recrutement de nouveaux individus,
- $h(t)$, le flux sortant dû à l'exploitation,
- $m(t)$, le flux sortant dû à la mortalité.

Une équation de conservation relie les variations temporelles du stock aux flux entrant et sortant :

$$\frac{dV}{dt}(t) = c(t) + r(t) - h(t) - m(t) \quad (4.1)$$

Par définition la production, notée $P(t)$, est la quantité de matière produite depuis l'origine (Pardé & Bouchon, 1988), c'est-à-dire :

$$P(t) = \int_0^t [c(s) + r(s)] ds$$

En utilisant l'équation de conservation, on peut aussitôt réécrire la production comme :

$$P(t) = V(t) - V(0) + \int_0^t [h(s) + m(s)] ds$$

Le premier terme correspond à la variation du stock sur pied entre l'instant initial et l'instant t . Il est relativement facile à estimer puisque deux inventaires aux instants initial et t donneront des estimations de $V(t)$ et $V(0)$. De plus, pour peu qu'il y ait un événement fondateur du peuplement tel que le stock soit nul au départ (ce qui est le cas pour des plantations, des jachères, ou plus généralement pour tout peuplement ayant subi une coupe rase), alors $V(0) = 0$. Le second terme, qui se présente comme la somme au cours du temps des flux de mortalité et d'exploitation, est en revanche beaucoup plus difficile à estimer. Si le peuplement est jeune, on peut estimer que la mortalité est négligeable ; pour peu qu'aucune exploitation ou éclaircie n'ait encore eu lieu, on a alors de façon approximative :

$$P(t) \simeq V(t) \quad (\text{pour } t \text{ petit})$$

c'est-à-dire que la production est proche du stock sur pied. Cette approximation est fréquemment utilisée pour estimer la production.

La figure 4.2 montre de façon schématique l'évolution temporelle du stock $V(t)$ et de la production $P(t)$. L'évolution est typiquement sigmoïdale et tend vers un régime stationnaire où le stock $V(t)$ est constant et maximal. Il y a dans le régime stationnaire un équilibre entre le flux entrant total $c(t) + r(t)$ et le flux sortant total $h(t) + m(t)$. La production augmente alors de façon linéaire.

Par définition, la productivité est la production ramenée à une unité de temps. On distingue :

- la productivité moyenne, notée $A(t)$, qui est la production au temps t divisée par ce temps t mis pour l'atteindre :

$$A(t) = \frac{P(t)}{t}$$

- la productivité courante, notée $a(t)$, qui est la dérivée par rapport au temps de la production :

$$a(t) = \frac{dP}{dt}(t)$$

On vérifie aisément, à partir de la définition de la production, que la productivité courante est aussi égale au flux total entrant : $a(t) = c(t) + r(t)$. En pratique, la productivité courante est estimée comme le ratio de la variation

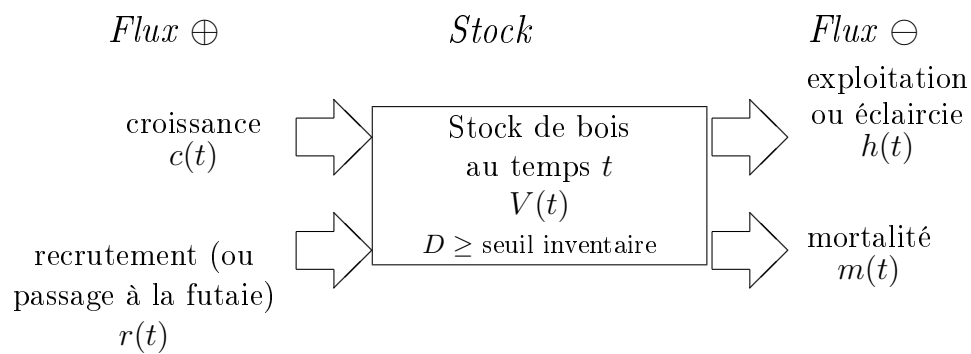


FIG. 4.1 – Schéma montrant les flux entrant et sortant de la forêt considérée comme un stock de bois.

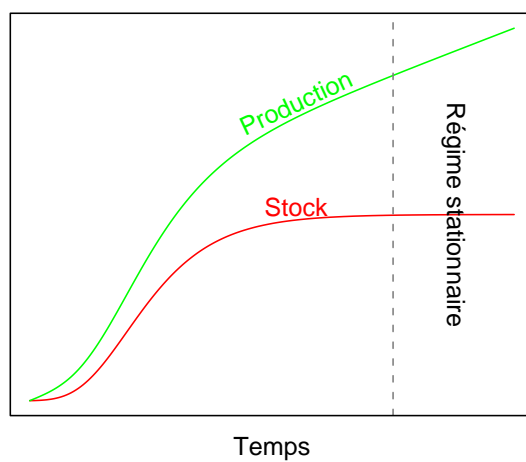


FIG. 4.2 – Évolution temporelle schématique du stock $V(t)$ et de la production $P(t)$.

de la production entre un instant t et un instant $t + \Delta t$ sur le pas de temps Δt :

$$a(t) \simeq \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t}$$

où le pas de temps Δt est petit au regard de la dynamique naturelle (typiquement $\Delta t = 1$ ou 2 ans).

Un premier constat très important découle de cette définition : la productivité est une grandeur *dynamique*, qui évolue au cours du temps. On ne peut donner de façon absolue la productivité d'un peuplement : il faut préciser à quel stade de développement du peuplement elle se réfère ; autant d'histoires, autant de valeurs de la productivité, pour un même peuplement. Par ailleurs production et productivité véhiculent la même information : l'une se déduit de l'autre, et réciproquement. Enfin, on parle parfois d'accroissement plutôt que de productivité. Les deux termes sont strictement équivalents dans le contexte forestier.

Ce concept de la productivité a joué un rôle important dans la rationalisation de la gestion forestière car il donne la clé pour optimiser le mode de gestion en coupes rases périodiques (Prodan, 1968a). Le raisonnement repose cependant implicitement sur l'hypothèse suivante : *la ressource est l'intégralité du matériel végétal qui pousse et l'exploitation la remet à zéro* (hypothèse d'exclusivité de la ressource). Cette hypothèse est bien vérifiée pour les plantations et la plupart des forêts tempérées, ce qui a fait le succès de la notion de productivité. L'hypothèse d'une ressource qui est l'intégralité du bois présent correspond concrètement à un peuplement monospécifique équienne. Cela n'est pas le cas des savanes : les essences y sont multiples et ne subissent pas de façon équivalente la pression d'exploitation. Certaines essences (schématiquement celles avec le bois le plus dense) sont préférées pour faire du bois de feu, d'autres sont délaissées. De plus l'exploitation pratiquée ne correspond pas à une coupe rase mais s'apparente plutôt à une coupe sélective ou jardinage. Enfin, le bois mort, habituellement considéré comme un flux sortant qui fait diminuer le stock sur pied, fait partie à part entière de la ressource dans le cas du bois de feu. Cette dernière considération n'est en soi pas trop contraignante car on a la liberté de redéfinir le stock de la ressource comme la somme du bois vivant et du bois mort. Il suffit alors de redéfinir un flux sortant comme la dégradation du bois mort en matière organique retournant dans le sol.

La conséquence de la non-vérification de l'hypothèse d'exclusivité de la ressource dans le cas des savanes est que le raisonnement précédemment utilisé pour déterminer le mode de gestion optimum ne donne plus cet optimum. Une exploitation pratiquée sur un cortège d'essences (les essences exploitables) va profiter aux autres essences du peuplement, ce qui va entraîner un

glissement de la composition spécifique du peuplement forestier. L'optimum calculé sans tenir compte de ce phénomène va entraîner un décalage entre la production attendue au terme de la rotation (juste avant l'exploitation) et celle effectivement obtenue.

4.2 Données sur la productivité en Afrique de l'ouest

Le tableau 4.1 récapitule les différents chiffres trouvés dans la littérature postérieure à 1982 (excepté Poupon, 1979), et la façon dont ils ont été obtenus. Pour la bibliographie antérieure à 1982, on pourra consulter les synthèses de Catinot (1984, 1994); Clément (1982); FAO (1984); en particulier dans les études de Clément (1982) et de la FAO (1984) figurent des tableaux récapitulatifs de la productivité qui ne sont pas repris ici. La figure 4.3 reprend ces chiffres dans un graphe productivité en fonction de la pluviométrie.

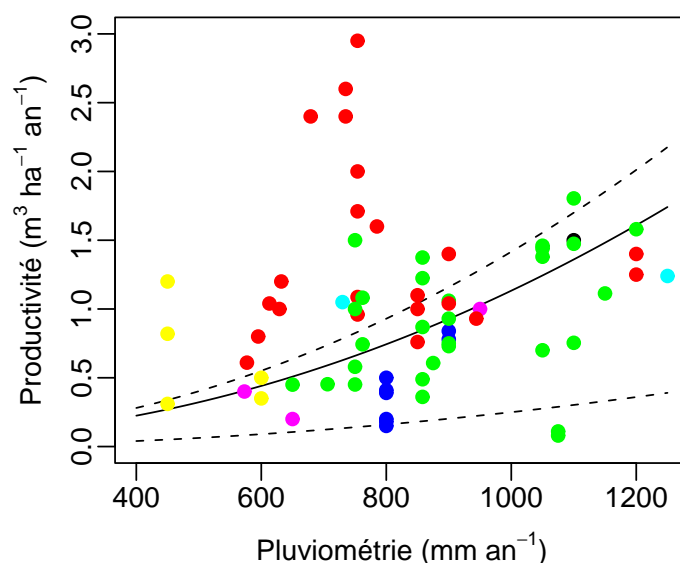


FIG. 4.3 – Chiffres de productivité trouvés dans la littérature : ● Burkina Faso, ● Cameroun, ● Mali, ● Niger, ● Nigeria, ● Sénégal, ● Togo.

4.2.1 Formule utilisée pour calculer la productivité

La plupart des études calculent la productivité à partir du stock ligneux sur pied $V(t)$. Seul Ichaou (1995) a entrepris d'évaluer la production totale

$P(t)$ en ajoutant au stock ligneux sur pied les pertes totales (prélèvements par la population en l'occurrence), notées $Q(t)$:

$$Q(t) = \int_0^t [h(s) + m(s)] ds$$

Ce dernier terme s'avère d'ailleurs difficile à estimer de façon précise. Ichaou l'estime par des enquêtes auprès des populations pour savoir la quantité de bois de feu qu'ils consomment (et donc qu'ils prélèvent).

Le stock ligneux sur pied $V(t)$ constitue une bonne approximation de la production totale pour des peuplements jeunes ou mis en défens. Les études de [Poupon \(1979\)](#); [Peltier & Eyog Matig \(1989\)](#); [Nouvellet \(1992\)](#); [CIRAD \(1993\)](#); [Nygård \(2000\)](#) reposent sur ce principe. En revanche l'étude de [Coulbaly \(1998\)](#) conduit vraisemblablement à une sous-estimation de la productivité, dans la mesure où il a ignoré les prélèvements ligneux effectués par les populations et les dégâts du feu dans les jachères. Ces effets peuvent être importants: [Baudu \(1998\)](#) montre pour des jachères proches de Fana au Mali que la densité d'arbres se stabilise dès 5–10 ans et qu'il n'y a pas d'effet de l'âge de la jachère sur sa surface terrière; en revanche il y a un effet du village d'appartenance de la jachère sur sa surface terrière. Ainsi le stock ligneux des jachères étudiées par Baudu est avant tout influencé par les pratiques humaines.

4.2.2 Composantes prises en compte pour l'estimation de la production

Les composantes qui entrent en jeu dans l'estimation de la production ou du stock ligneux sont variables d'une étude à une autre. On peut distinguer trois types de variations :

1. des variations sur les parties de l'arbre qui sont prises en compte : certaines études prennent en compte l'ensemble des parties ligneuses de l'arbre, depuis le tronc jusqu'aux dernières ramifications, d'autres se limitent à certaines parties de l'arbre. En particulier les parties ligneuses souterraines (racines) sont rarement prises en compte (seule exception : [Poupon, 1979](#));
2. des variations sur la sélection des individus pris en compte : certaines études prennent en compte toutes les tiges, d'autres se limitent aux tiges de taille supérieure à un seuil ;
3. quand le stock ligneux est évaluée par sa surface terrière, les variations de la hauteur à laquelle la circonférence est mesurée jouent également : une surface terrière à 1,30 m est plus faible qu'une surface terrière à la base.

Le choix des parties de l'arbre prises en compte dans l'estimation du stock ligneux n'est pas indépendant de l'objectif même de l'étude : si on s'intéresse à la productivité en bois d'œuvre, ni les petites branches ni le système racinaire ne seront pris en compte ; si on s'intéresse au bois de feu, les petites branches seront prises en compte mais pas le système racinaire ; si on s'intéresse à la quantité de carbone stocké, à la fois les petites branches et le système racinaire seront pris en compte. Toutes ces différences peuvent conduire à des estimations très différentes de la productivité.

4.2.3 Méthodes de mesure

On observe également, d'une étude à l'autre, des méthodes variées estimer le stock ligneux et l'âge du peuplement. Concernant l'estimation du stock ligneux : certaines études s'appuient sur la circonférence des tiges à leur base, d'autres sur la circonférence à 1,30 m de hauteur ; certaines études s'appuient sur une mesure directe du biovolume, d'autres réalisent une mesure de la biomasse (fraîche ou sèche), qui est ensuite convertie en biovolume grâce à la densité du bois ; des relations d'allométrie peuvent également être utilisées pour estimer le biovolume ou la biomasse à partir de la circonférence ou de la surface terrière, etc.

Quant à l'âge du peuplement, deux cas principaux sont à distinguer selon que le peuplement est naturel ou qu'il s'agit d'un dispositif ayant subi un traitement. Dans le premier cas (Poupon, 1979; Ichaou, 1995), il n'y a pas d'événement fondateur du peuplement (ou alors celui-ci remonte à trop longtemps). L'âge du peuplement est alors estimé comme la moyenne des âges des arbres qui le composent. Dans le deuxième cas (Peltier & Eyog Matig, 1989; Nouvellet, 1992; CIRAD, 1993; Ichaou, 1995; Nygård, 2000), l'âge du peuplement est connu : c'est le temps écoulé depuis le moment où le traitement (en général une coupe rase) a été appliqué.

Il n'y a aucune raison *a priori* pour que ces deux « âges » soient équivalents : un peuplement naturel dont les arbres ont en moyenne 12 ans n'est pas équivalent à un peuplement qui a subi une coupe rase il y a 12 ans. Ces deux « âges » correspondent également à deux modes de gestion du peuplement : par coupe rase ou par prélèvements ponctuels (émondage des arbres verts).

La façon de calculer l'âge moyen des arbres de façon à estimer l'âge d'un peuplement naturel est elle-même différente d'une étude à une autre. Ichaou (1995) calcule : $A(t) = P(t)/t$, où :

$$t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$$

avec : N = nombre d'arbres dans le peuplement et t_i = âge du i^e arbre ; t est la moyenne arithmétique des âges des arbres du peuplement. Cela revient à calculer :

$$A(t) = \lambda \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N t_i}$$

où λ est la densité du peuplement et b_i est la biomasse du i^e arbre. [Poupon \(1979\)](#) utilise une formule légèrement différente pour la productivité moyenne :

$$A(t) = \frac{\lambda}{N} \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{t_i}$$

qui correspond à la moyenne des accroissements moyens annuels en biomasse des arbres. Introduisons

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\sum_{i=1}^N b_i/t_i}{\sum_{i=1}^N 1/t_i} \\ \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_i} \end{aligned}$$

β représente la biomasse moyenne, obtenue comme la moyenne pondérée par l'inverse des âges des biomasses individuelles, et τ représente l'âge moyen, obtenu comme une moyenne harmonique des âges individuels. On retrouve alors l'expression habituelle de la productivité moyenne : $A = \lambda\beta/\tau$. En résumé, Ichaou utilise une moyenne arithmétique des âges des arbres alors que Poupon utilise une moyenne harmonique des âges des arbres pour estimer l'âge du peuplement.

4.2.4 Une productivité ou des productivités ?

Les chiffres sur la productivité dans la littérature sont très variables (ils varient d'un facteur 1 à 3, voire 4). Cette variabilité découle du fait qu'il y a « plusieurs » productivités (productivité courante ou moyenne ; productivité définie par rapport à la production ligneuse totale ou par rapport au stock ligneux sur pied), et de la diversité des façons d'estimer le stock ligneux (quelle grandeur est mesurée : le volume, la masse, la surface terrière ? quel stock est mesuré : en se limitant aux tiges de taille supérieure à un seuil, en se limitant à certaines parties de l'arbre ?)

Il n'y a donc pas de méthode standard d'estimation de la productivité. La productivité est un terme générique pour désigner une production ramenée à une unité de temps et les auteurs peuvent mettre derrière ce terme des grandeurs assez différentes. La comparaison directe de chiffres de productivité paraît donc aventureuse.

TAB. 4.1 – *Chiffres de productivité trouvés dans la littérature.*

Auteur	Site d'étude	Pluviométrie (mm/an)	Type	Composantes prises en compte	Productivité	
					Valeur	Méthode d'estimation
Poupon (1979)	Steppe sahélienne au nord Sénégal (Fété-Olé), mise en défens intégral	220 (période 1970–77)	$V(t)/t$	Biomasse aérienne ligneuse (tronc, grosses branches, biomasse souterraine (tronc racinaire, racines), biomasse caduque (feuilles, fleurs, fruits). Pas de limite de taille.	0,42 t/ha/an de biomasse sèche au total, dont 0,36 t/ha/an pour la biomasse aérienne ligneuse et 0,12 t/ha/an pour la biomasse caduque	La biomasse de chaque composante et l'âge des arbres sont estimés par des relations allométriques à partir de la circonférence à la base.
Goudet (1985)	Savanes et steppes buissonnantes en zone sahélo-saharienne				0,05 à 0,1 m ³ /ha/an	Synthèse d'actions menées au Tchad, Cameroun, RCA, Niger, Burkina Faso, Mali, Sénégal (sans autre précision)
	Savanes et steppes arborées en zone sahélo-soudanienne				0,1 à 0,5 m ³ /ha/an	
	Savanes boisées et forêts claires en zone soudano-sahélienne				0,5 à 1 m ³ /ha/an	
	Forêts claires en zone soudano-guinéenne				1 à 1,5 m ³ /ha/an	
	Savane arborée du Burkina Faso (Gonsé)	700–800	$V(t)/t$		de 0,96 à 2 m ³ /ha/an suivant l'année d'inventaire	
Bonkougou & de Framond (1988)	Savane arborée du nord Cameroun (Laf-Badjava)	800	$V(t)/t$	Tiges de diamètre > 3 cm et < 12 cm	de 0,15 à 0,5 m ³ /ha/an suivant la présence ou non de pâturage, de feux (précoce ou tardif)	Le bois est pesé vert, puis converti en volume par l'intermédiaire de la densité du bois. L'âge est connu.
Peltier & Eyog Matig (1989)	Savane arborée du Burkina Faso (Gonsé), mise en défens intégral + coupe à blanc	754 (période 1970–91)	$V(t)/t$	Gros bois (circonférence à la base > 10 cm) et petit bois (circonférence < 10 cm)	2,39 t/ha/an de biomasse verte au total (\approx 1,64 t/ha/an de biomasse sèche), dont 1,39 t/ha/an de gros bois, soit 2,95 m ³ /ha/an au total, dont 1,71 m ³ /ha/an de gros bois	Chaque composante est pesée fraîche. Une densité moyenne du bois vert permet de convertir la masse en volume. Le rapport masse fraîche / masse sèche est également estimé. L'âge est connu.
Nouvellet (1992, 1993)						
CIRAD (1993)	Savane du Sénégal (Vélor) coupée à blanc	573 (période 1966–84)	$V(t)/t$	Tiges de diamètre à 1,30 m \geq 6 cm	0,4 m ³ /ha/an	Le volume des tiges est calculé à l'aide d'un tarif de cubage basé sur le diamètre à 1,30 m. L'âge est connu.

Ichaou (1995)	Brousses tigrée naturelle du Niger (Bani-zoumbou)	400-500 (période 1973-83)	$P(t)/t$	Tiges de diamètre > 4 cm	1,2 m ³ /ha/an ou 1,45 t/ha/an de biomasse verte ou 0,75 t/ha/an de biomasse sèche	Le volume des tiges est mesuré. Les prélèvements sont évalués par enquête auprès des populations. L'âge du peuplement est l'âge moyen des arbres estimé à partir des cerne de croissance.
	Brousse diffuse naturelle du Niger (Tientergou)		$P(t)/t$		0,82 m ³ /ha/an ou 1,48 t/ha/an de biomasse verte ou 0,69 t/ha/an de biomasse sèche	
	Brousse diffuse du Niger (Tientergou), exploitée en taillis		$V(t)/t$		0,31 m ³ /ha/an ou 0,22 t/ha/an de biomasse sèche	
Coulibaly (1998)	Jachères du Mali (arrondissement de Ouellesseboungou)	1075	$V(t)/t$	Tiges (houppiers exclus) dont la circonférence à 1,30 m dépasse 10 cm	De 0,08 m ³ /ha/an à 0,11 m ³ /ha/an suivant l'âge de la jachère	Le volume de chaque tige (houppier exclus) est estimé à l'aide d'un tarif de cubage basé sur la circonférence à la base. L'âge est obtenu par enquête auprès des paysans.
	Savane arborée du Burkina Faso (Sa, Tiogo, Yabo, Gonsé, Bissiga), mise en défens intégral + coupe à blanc	629-785 (période 1982-97)	$V(t)/t$	Tiges de circonférence à 1,30 m > 10 cm Gros bois (circonférence à 1,30 m > 10 cm) + petit bois (circonférence < 10 cm)	0,52 m ² /ha/an en surface terrière 1,1 t/ha/an de biomasse sèche, soit 1,7 m ³ /ha/an	La circonférence est mesurée et l'âge est connu. Est mesurée la biomasse fraîche. Les coefficients de teneur en eau permettent de la convertir en biomasse sèche, puis en biovolume par l'intermédiaire de la densité du bois. L'âge est connu.

4.3 Les formules de synthèse

Deux formules modélisant la productivité existent pour le Mali. La première est la courbe de [Clément \(1982\)](#), dont le domaine d'application correspond en fait à toute l'Afrique de l'ouest, pour des pluviométries allant de 400 (Niger) à 1600 mm / an (République Centrafricaine). Clément prédit la productivité en fonction d'une part de la pluviométrie, et d'autre part d'un facteur à 3 modalités qui décrit l'état de dégradation de la végétation (peuplement avec protection, peuplement sans protection, peuplement très dégradé). La formule est :

$$A \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) = 0.05129 + 1.08171p^2$$

pour les peuplements sans protection, où p est la pluviométrie moyenne annuelle en mm an^{-1} . Pour les peuplements avec protection, cette productivité est majorée d'un facteur 1,25. Pour les peuplements très dégradés, la productivité est calculée selon la formule :

$$A \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) = 0.25p^2$$

où p est la pluviométrie moyenne annuelle en mm an^{-1} .

L'autre formule a été établie par [Sylla \(1997\)](#) pour le Mali. Elle a été utilisée dans les schémas directeurs d'approvisionnement en bois énergie des villes de Bamako, Ségou, Mopti et Koutiala ([SED-CCL, 1998a,b, 1999a,b; Sylla & Nouvellet, 2001](#)) pour évaluer l'équilibre entre la consommation et la production de bois. La formule est :

$$A \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}) = 0.3699 \exp(3.1652pr^2)$$

où p est la pluviométrie en mm an^{-1} et r le taux de recouvrement (nombre entre 0 et 1).

4.3.1 Comparaison des deux formules

Ces deux formules sont comparées sur la figure 4.4, pour des pluviométries allant de 400 à 1100 mm an^{-1} (ce qui correspond à l'éventail des valeurs dans notre zone d'étude). Le graphique de droite de la figure 4.4 montre la valeur du taux de recouvrement r qui assure l'égalité entre la valeur de la productivité prédite par la formule de Clément et celle de Sylla, pour chaque valeur de la pluviométrie. En-dessous de 543 mm annuels, la formule de Clément donne systématiquement une estimation inférieure à celle de Sylla, quel que soit le taux de recouvrement. Au delà de ce seuil, les deux formules donnent des prédictions égales pour un taux de recouvrement qui augmente avec la pluviométrie. Ce résultat est logique dans la mesure où le taux de recouvrement des peuplements non perturbés augmente avec la pluviométrie.

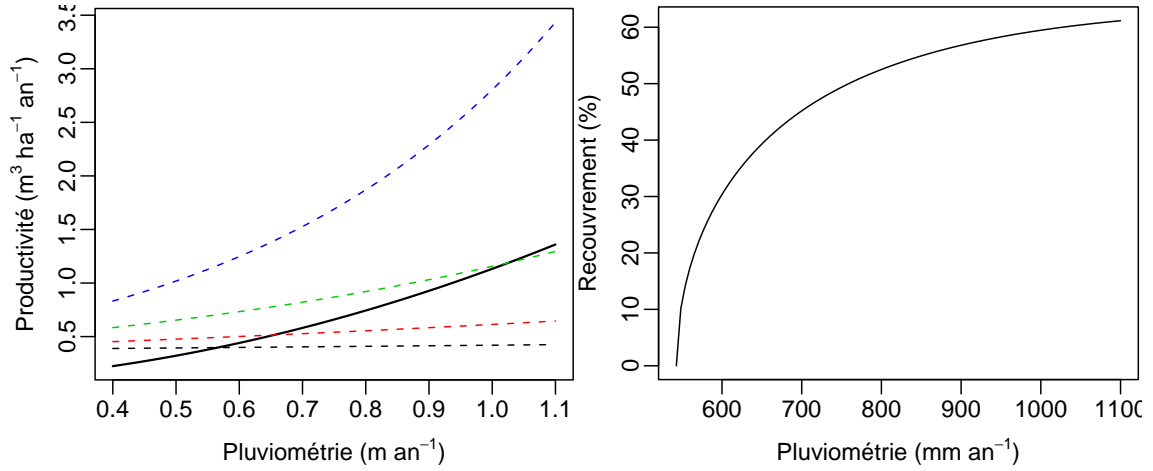


FIG. 4.4 – Comparaison des courbes de [Clément \(1982\)](#) et [Sylla \(1997\)](#). À gauche : en trait plein, courbe de Clément ; en pointillés, courbe de Sylla : en noir, $r = 0.2$; en rouge, $r = 0.4$; en vert, $r = 0.6$; en bleu, $r = 0.8$. À droite, valeur du taux de recouvrement r en fonction de la pluviométrie qui assure l'égalité entre la valeur prédite par la formule de Clément et celle prédite par la formule de Sylla.

4.3.2 Productivité ou potentialité ?

La figure 4.5 confronte la formule de [Clément \(1982\)](#) aux données de productivités disponibles dans la littérature avant 1982. L'accord entre les données et la formule paraît correct. Cet accord devient beaucoup plus contestable quand on superpose à la figure les données de productivités acquises depuis 1982 (figure 4.3). Le désaccord entre la formule de Clément et les données de productivité acquises récemment peut s'expliquer de plusieurs façons : la ressource n'est pas définie de la même manière (bois de feu de petite taille ou bois d'œuvre de grosse taille, etc.) ; la mesure n'est pas effectuée de la manière... Surtout la formule de Clément donne un chiffre de productivité de manière absolue, sans référence à l'état du peuplement. Elle traduit un gradient climatique macroscopique (transition de la zone soudano-guinéenne à la zone sahélienne) et n'est donc pas en mesure de rendre compte de variations locales dues à des états de peuplements variables. En ce sens, elle exprime plus une potentialité (c'est-à-dire la productivité potentielle d'un peuplement dans un état de référence) qu'une productivité.

La formule de [Sylla \(1997\)](#) est plus à même de rendre compte de variations locales de la productivité dans la mesure où elle intègre une variable descriptive de l'état du peuplement, à savoir son taux de recouvrement. Ce-

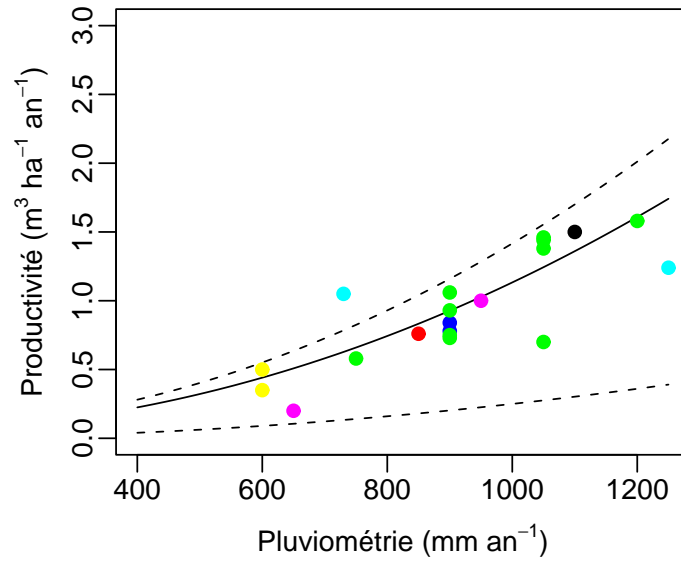


FIG. 4.5 – Chiffres de productivité trouvés dans la littérature avant 1982 : ● Burkina Faso, ● Cameroun, ● Mali, ● Niger, ● Nigeria, ● Sénégal, ● Togo. Les courbes représentent la formule de Clément (1982) (courbe continue : peuplement sans protection ; courbe pointillée supérieure : peuplement avec protection ; courbe pointillée inférieure : peuplement dégradé).

pendant elle ne tient pas compte de la nature des espèces qui composent le peuplement, ni de la structure du peuplement. Par exemple, dans la perspective de production de bois énergie, un peuplement d'*Anogeissus leiocarpus* ne peut pas être considéré comme ayant la même productivité qu'un peuplement de *Sterculia setigera*. De même un peuplement composé d'une multitude de petites tiges n'aura pas la même productivité qu'un peuplement composé de quelques grands individus, quand bien même le taux de recouvrement est le même dans les deux cas. En tout état de cause, faute de mieux dans l'état actuel des connaissances, nous recommandons l'utilisation de la formule de Sylla (1997) pour une estimation rapide de la productivité des savanes pour la production de bois énergie.

Bibliographie

- AHERNE, W.A. & DIGGLE, P.J. (1978) The estimation of neuronal population density by a robust distance method. *Journal of Microscopy* **114**, 285–293. [79](#)
- ALEGRIA, J., HEERMANS, J.G. & MINNICK, G. (1986) *A sampling system for determining fuelwood for combretaceae at the Guesselbodi national forest, Niger*. Rapport technique, Ministère de l'hydraulique et de l'environnement du Niger, Direction forêts et faune, Niamey, Niger. [87](#), [89](#)
- ARBONNIER, M. (1990) *Étude d'une savane graminéenne et forestière en vue de son aménagement, à partir du cas de Koumpentoum (Sénégal)*. Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, Nancy, France. 2 volumes. [10](#)
- BAGNOUD, N. & KOUYATÉ, A.M. (1996) *Estimation du volume de bois des formations savaniques de la zone soudanienne (cercle de Sikasso) - Tarifs de cubage pour quelques espèces ligneuses et relations dendrométriques pour le bois de feu*. Document Appui à la Recherche Forestière de Sikasso (ARFS) 96/3, Ministère du développement rural et de l'environnement, Institut d'Économie Rurale, Centre régional de recherche agronomique de Sikasso, Sikasso, Mali. [83](#), [84](#), [86](#), [88](#), [89](#), [90](#)
- BATCHELER, C.L. (1971) Estimation of density from a sample of joint point and nearest-neighbor distances. *Ecology* **52**, 703–709. [79](#)
- BAUDU, M. (1998) *Mise au point d'une méthode d'évaluation de la ressource ligneuse diffuse des jachères du Mali*. Mémoire du DEA fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale, INA-PG, Université Paris 6, ENS Paris, Paris, France. [56](#)
- BELLEFONTAINE, R., GASTON, A. & PETRUCCI, Y. (1997) *Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches*. FAO, Rome. [18](#)
- BONKOUNGOU, E.G. & DE FRAMOND, H. (1988) Dynamique du peuplement et évolution de la productivité d'une parcelle de formation naturelle en forêt de Gonsé, Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques* **218**, 63–70. [59](#)
- BORMANN, F.H. (1953) The statistical efficiency of sample plot size and shape in forest ecology. *Ecology* **34**, 474–487. [23](#)

- BOULET, R. (1978) *Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : équilibre et déséquilibre pédobioclimatique*. Mémoires ORSTOM 85, ORSTOM, Paris. Publication d'une thèse de doctorat en sciences naturelles de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1974. [12](#)
- BYTH, K. (1982) On robust distance-based intensity estimators. *Biometrics* **38**, 127–135. [79](#)
- CATANA, A.J.J. (1963) The wandering quarter method of estimating population density. *Ecology* **44**, 349–360. [79](#)
- CATINOT, R. (1984) En Afrique francophone l'avenir forestier tropical se jouera dans le cadre du monde rural. *Bois et Forêts des Tropiques* **203**, 7–43. [55](#)
- CATINOT, R. (1994) Aménager les savanes boisées africaines ; un tel objectif semble désormais à notre portée. *Bois et Forêts des Tropiques* **241**, 53–70. [55](#)
- CIRAD (1993) *Renforcement des activités de recherches menées dans les pays africains dans le domaine de la connaissance de la productivité et de la croissance des formations naturelles mixtes, forestières et graminéennes dans le but de leur aménagement au Sénégal*. Rapport final d'une étude financée par la commission des communautés européennes, direction générale de la science, de la recherche et du développement (no. de contrat ts-0081), Cirad-Forêt, Nogent-sur-Marne, France / ISRA-DRPF, Dakar, Sénégal. [56](#), [57](#), [59](#)
- CLAYTON, G. & COX, T.F. (1986) Some robust density estimators for spatial point processes. *Biometrics* **42**, 753–767. [79](#)
- CLÉMENT, J. (1982) Estimation des volumes et de la productivité des formations mixtes forestières et graminéennes tropicales. *Bois et Forêts des Tropiques* **198**, 35–58. [55](#), [61](#), [62](#), [63](#)
- COMPAORÉ, A. & LABAN, P. (1983) *Évaluation des terres appliquée à l'aménagement de la forêt classée de Yabo*. Document technique DAFR/AF/02, Ministère de l'Environnement et du Tourisme, Direction de l'Aménagement Forestier et du Reboisement, Service de l'Aménagement Forestier, Ouagadougou, Burkina Faso. [20](#)
- CONSEIL SCIENTIFIQUE POUR L'AFRIQUE (CSA) (1956) *Réunion Yanguambi sur la classification des formations végétales de l'Afrique*. Publication 22, Commission de Coopération Technique en Afrique au sud du Sahara (CCTA), Londres, UK. Réimprimé en 1961 comme la publication n°53. [12](#)
- COTTAM, G. & CURTIS, J.T. (1956) The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology* **37**, 451–460. [79](#)

- COULIBALY, S.M. (1998) *Détermination de la productivité des jachères dans la zone de Ouellessebouyou*. Mémoire de fin de cycle, Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA), Katibougou, Mali. 56, 60
- COVI, S. (1988) *Résultats de l'inventaire forestier dans la concession du CFPP de Morondava*. Rapport technique, Centre de Formation Professionnelle Forestière "Fofampiala", Morondava, Madagascar. 19, 20
- COX, T.F. (1976) The robust estimation of the density of a forest stand using a new conditioned distance method. *Biometrika* **63**, 493–499. 79
- CRESSIE, N. (1991) *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York. 15
- CTFT (1989) *Mémento du forestier*. Ministère de la Coopération, Paris. 22
- DE VRIES, P.G. (1986) *Sampling Theory for Forest Inventory - A Teach-Yourself Course*. Springer-Verlag, Berlin. 9
- DIGGLE, P.J. (1975) Robust density estimation using distance methods. *Biometrika* **62**, 39–48. 79
- DIGGLE, P.J. (1977) A note on robust density estimation for spatial point patterns. *Biometrika* **64**, 91–95. 79
- EBERHARDT, L.L. (1967) Some developments in distance sampling. *Biometrics* **23**, 207–216. 13, 79
- ENGEMAN, R.M., SUGIHARA, R.T., PANK, L.F. & DUSENBERRY, W.E. (1994) A comparison of plotless density estimators using Monte Carlo simulation. *Ecology* **75**, 1769–1779. 79
- FALL, T. & GUEYE, S. (1993a) *Plan d'aménagement sylvo-pastoral de la forêt de Dabo*. Rapport technique, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique. Direction des Eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, Kolda, Sénégal. Projet SEN 87/028. 19, 20
- FALL, T. & GUEYE, S. (1993b) *Plan de gestion sylvo-pastorale de la forêt de Dabo*. Rapport technique, Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature. Direction des Eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, Kolda, Sénégal. Projet SEN 87/028. 19, 20
- FAO (1984) *Études sur les volumes et la productivité des peuplements forestiers tropicaux - 1. Formations forestières sèches*. FAO, Rome. 55
- GAMBILL, C.W., WIAAT, J., H. V. & YANDLE, D.O. (1985) Optimum plot size and BAF. *Forest Science* **31**, 587–594. 23
- GOUDET, J.P. (1985) *L'arbre et les formations ligneuses en Afrique tropicale sèche*. Rapport pour la consultation d'experts sur le rôle de la foresterie dans la lutte contre la désertification, saltillo, mexique, 24-28 juin 1985, CIRAD-CTFT, Nogent-sur-Marne, France. 59

- GOVE, J.H. (2003) Moment and maximum likelihood estimators for Weibull distributions under length- and area-biased sampling. *Environmental and Ecological Statistics* **10**, 455–467. [9](#)
- GRENIER, Y., BLAIS, L. & LAVOIE, É. (1991) Aire minimum d'échantillonnage ou nombre de points de prisme nécessaires pour établir la structure d'un peuplement inéquienne. *Canadian Journal of Forest Research* **21**, 1632–1638. [23](#)
- HEBERT, J., RONDEUX, J. & LAURENT, C. (1988) Comparaison par simulation de 3 types d'unités d'échantillonnage en futaies feuillues de hêtre (*Fagus silvatica* l.). *Annales des Sciences Forestières* **45**, 209–221. [23](#)
- HOLGATE, P. (1964) The efficiency of nearest neighbour estimators. *Biometrics* **20**, 647–649. [79](#)
- HOLGATE, P. (1965a) The distance from a random point to the nearest point of a closely packed lattice. *Biometrika* **52**, 261–263. [79](#)
- HOLGATE, P. (1965b) Tests of randomness based on distance methods. *Biometrika* **52**, 345–353. [79](#)
- ICHAOU, A. (1995) *Étude de la productivité des formations forestières de brousse tigrée et de brousse diffuse: conséquences pour la gestion et la régénération de ces formations*. Mémoire de fin de cycle ingénieur, Institut Polytechnique Rural de Katibougou, Katibougou, Mali. [27](#), [55](#), [57](#), [60](#)
- ICHAOU, A. (2000) *Dynamique et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'ouest nigérien*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Toulouse. [27](#)
- INERA (1998) *Assistance scientifique au projet PNUD / BKF / 93 / 003 « Aménagement des forêts naturelles » : suivie écologique des zones en aménagement, régénération et seuils de reconstitution des populations de ligneux des zones en aménagement, élaboration de méthodes de quantification du bois sur pieds*. Rapport 004, Ministère des enseignements secondaire, supérieur et de la recherche scientifique, Centre national de la recherche scientifique et technologique, Institut de l'environnement et de recherches agricoles, Département productions forestières, Ouagadougou, Burkina Faso. [83](#)
- JOHNSON, F.A. & HIXON, H.J. (1952) The most efficient size and shape of plot to use for cruising in old growth Douglas-fir timber. *Journal of Forestry* **50**, 17–20. [23](#)
- JONSSON, B., HOLM, S. & KALLUR, H. (1992) A forest inventory method based on density-adapted circular plot size. *Scandinavian Journal of Forest Research* **7**, 405–421. [79](#)

- KABORÉ, C. (1992) *Estimation de la biomasse ligneuse des forêts naturelles sèches*. Rapport technique, Ministère de l'environnement et du tourisme du Burkina Faso, Ouagadougou, Burkina Faso. 84
- KENDALL, M.G. & MORAN, P.A.P. (1963) *Geometrical Probability*. Griffin, London, UK. 79
- KEULS, M., OVER, H.J. & DE WIT, C.T. (1963) The distance method for estimating densities. *Statistica Neerlandica* **17**, 71–91. 79
- LANLY, J.P. (1981) *Manuel d'inventaire forestier, avec références particulières aux forêts tropicales hétérogènes*. Études FAO: Forêts 27, FAO, Rome, Italie. 9
- LESSARD, V.C., DRUMMER, T.D. & REED, D.D. (2002) Precision of density estimates from fixed-radius plots compared to n -tree distance sampling. *Forest Science* **48**, 1–6. 79
- LEWIS, S.M. (1975) Robust estimation of density for a two-dimensional point process. *Biometrika* **62**, 519–521. 79
- LOUPPE, D., KOUA, M. & COULIBALY, A. (1994a) *Tarifs de cubage pour Afzelia africana Smith en forêt de Badénou (nord Côte d'Ivoire)*. Rapport technique, Institut des Forêts (IDEFOR), département foresterie, Côte d'Ivoire. 85, 86
- LOUPPE, D., KOUA, M. & COULIBALY, A. (1994b) *Tarifs de cubage pour Diospyros mespiliformis Hochst. en forêt de Badénou (nord Côte d'Ivoire)*. Rapport technique, Institut des Forêts (IDEFOR), département foresterie, Côte d'Ivoire. 88
- LOUPPE, D., KOUA, M. & COULIBALY, A. (1994c) *Tarifs de cubage pour Khaya senegalensis en forêt de Badénou (nord Côte d'Ivoire)*. Rapport technique, Institut des Forêts (IDEFOR), département foresterie, Côte d'Ivoire. 89, 90
- LYNCH, T.B. & RUSYDI, R. (1999) Distance sampling for forest inventory in Indonesian teak plantations. *Forest Ecology and Management* **113**, 215–221. 79
- MAWSON, J.C. (1968) A Monte Carlo study of distance measures in sampling for spatial distribution in forest stands. *Forest Science* **14**, 127–139. 79
- MENGIN-LECREULX, P. & CHABANAUD, B. (1986) *Inventaire de la forêt classée de Faïra : fascicule I, description de la forêt, méthode et réalisation de l'inventaire*. Rapport technique, CTFT, Nogent-sur-Marne et Ministère de l'hydraulique et de l'environnement du Niger, projet IDA/FAC/CCCE. 10, 15, 19, 20, 30, 37
- MØLLER, J. & WAAGEPETERSEN, R.P. (2004) *Statistical Inference and Simulation for Spatial Point Processes*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton. 15

- MOORE, P.G. (1954) Spacing in plant populations. *Ecology* **35**, 222–227. [79](#)
- MORISITA, M. (1954) Estimation of population density by spacing method. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E* **1**, 187–197. [79](#)
- MORISITA, M. (1957) A new method for the estimation of density by the spacing method applicable to non-randomly distributed populations. *Physiology and Ecology (Kyoto)* **7**, 134–144. [79](#)
- NASI, R. (1994) *La végétation du centre régional d'endémisme soudanien au Mali. Étude de la forêt des monts Mandingues et essai de synthèse*. Thèse de doctorat, Université d'Orsay-Paris 11, Orsay. [12](#)
- NASI, R. & SABATIER, M. (1988) *Projet Inventaire des Ressources Ligneuses au Mali: les formations végétales*. Rapport de synthèse, première phase, Ministère chargé des ressources naturelles et de l'élevage, Direction nationale des eaux et forêts / BDPA / SCET-AGRI / CTFT, Bamako, Mali. [20](#)
- NOUVELLET, Y. (1992) *Évolution d'un taillis de formation naturelle en zone soudanienne du Burkina Faso*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6. 2 volumes. [56](#), [57](#), [59](#)
- NOUVELLET, Y. (1993) Évolution d'un taillis de formation naturelle soudano-sahélienne au Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques* **237**, 45–59. [59](#)
- NOUVELLET, Y. (2002) *Manuel d'aménagement forestier*. rapport sed/ccl, Ministère des mines et de l'énergie et Ministère de l'équipement rural et de l'environnement du Mali, Stratégie Énergie Domestique, Cellule Combustibles Ligneux, Bamako, Mali. [43](#), [82](#), [83](#), [85](#), [86](#), [87](#), [88](#), [89](#), [90](#)
- NYGÅRD, R. (2000) *Productivity of woody vegetation in savanna woodlands in Burkina Faso*. Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden. [56](#), [57](#), [60](#)
- PARDÉ, J. & BOUCHON, J. (1988) *Dendrométrie*. ENGREF, Nancy. [51](#)
- PARKAN, J., BENEMBAREK, M. & MEIJER, J.J. (1988) *Aménagement forestier et reboisement villageois de Koulikoro. Inventaire et éléments d'aménagement forestiers des massifs de Woro et de Dialakoro*. Document de travail 9, Mali, Ministère de l'environnement et de l'élevage, Bamako. FAO, FO: GCP/MLI/019/NET. [19](#), [20](#)
- PARKER, K.R. (1979) Density estimation by variable area transect. *Journal of Wildlife Management* **43**, 484–492. [79](#)
- PATIL, S.A., BURNHAM, K.P. & KOVNER, J.L. (1979) Non-parametric estimation of plant density by the distance method. *Biometrics* **35**, 597–604. [79](#)

- PATIL, S.A., KOVNER, J.L. & BURNHAM, K.P. (1982) Optimum non-parametric estimation of population density based on ordered distances. *Biometrics* **38**, 243–248. 79
- PAYANDEH, B. & EK, A.R. (1986) Distance methods and density estimators. *Canadian Journal of Forest Research* **16**, 918–924. 79
- PELTIER, R. & EYOG MATIG, O. (1989) Un essai sylvo-pastoral au nord-Cameroun ; mise en place d'un dispositif d'étude de la régénération et de la gestion d'une savane arborée dégradée en zone soudano-sahélienne à Laf-Badjava, premiers résultats. *Bois et Forêts des Tropiques* **221**, 3–23. 56, 57, 59
- PERSSON, O. (1964) Distance methods. The use of distance measurements in the estimation of seedling density and open space frequency. *Studia Forestalia Suecica* **15**, 1–68. 79
- PERSSON, O. (1971) The robustness of estimating density by distance measurements. In: *Statistical Ecology: Sampling and Modeling Biological Populations and Population Dynamics* (Eds. G. P. PATIL, E. C. PIELOU & W. E. WATERS). Pennsylvania State University Press, University Park, Pennsylvania, vol. 2, 175–190. 79
- PICARD, N. & BAR-HEN, A. (in press) Estimation of the density of a clustered point pattern using a distance method. *Environmental and Ecological Statistics* . 80
- PICARD, N., GUÉGUEN, K., ABDOULAYE, H., DIARISSO, D., KAREMBÉ, M., BIRNBAUM, P. & NASI, R. (2005a) Tree formations in relation with soil and grasses in a dry savanna in Mali, West Africa. *African Journal of Ecology* **43**, 201–207. 10
- PICARD, N., KOUYATÉ, A.M. & DESSARD, H. (2005b) Tree density estimations using a distance method in mali savanna. *Forest Science* **51**, 7–18. 80
- PICARD, N., SYLLA, M.L. & NOUVELLET, Y. (2004) Relationship between plot size and the variance of the density estimator in West African savannas. *Canadian Journal of Forest Research* **34**, 2018–2026. 13, 15
- PIRL (1991) *Projet Inventaire des Ressources Ligneuses au Mali - Synthèse technique*. Rapport de synthèse, deuxième phase, Ministère chargé des ressources naturelles et de l'élevage, Direction nationale des eaux et forêts / BDPA / SCET-AGRI / CTFT / Sysame. 81, 83
- POLLARD, J.H. (1971) On distance estimators of density in randomly distributed forests. *Biometrics* **27**, 991–1002. 79
- POUPON, H. (1979) *Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal*. Thèse de doctorat, Université d'Orsay - Paris 11, Paris, France. 55, 56, 57, 58, 59, 85, 86, 87, 89

- PRODAN, M. (1968a) *Forest Biometrics*. Pergamon Press, Oxford, UK. 54
- PRODAN, M. (1968b) Punktstichprobe für die forsteinrichtung. *Der Forst und Holzwirt* **23**, 225–226. 79
- SAVAGE, M.B. (1956) What about the size of the sample plot? *Forestry Chronicle* **32**, 75–76. 23
- SCHREUDER, H.T., BANYARD, S.G. & BRINK, G.E. (1987) Comparison of three sampling methods in estimating stand parameters for a tropical forest. *Forest Ecology and Management* **21**, 119–127. 23
- SCHREUDER, H.T., GREGOIRE, T.G. & WOOD, G.B. (1993) *Sampling methods for multiresource forest inventory*. Wiley & Sons, New York. 9
- SED-CCL (1998a) *Schéma directeur d’approvisionnement en bois énergie de Bamako*. Rapport technique, Ministère de l’environnement et Ministère des mines et de l’énergie du Mali, Stratégie Énergie Domestique, Cellule Combustibles Ligneux / groupement SEED - CIRAD-Forêt - BTG - AFRITEC - BEAGGGES, Bamako, Mali. 61
- SED-CCL (1998b) *Schéma directeur d’approvisionnement en bois énergie de la ville de Ségou*. Rapport technique, Ministère de l’environnement et Ministère des mines et de l’énergie du Mali, Stratégie Énergie Domestique, Cellule Combustibles Ligneux / groupement SEED - CIRAD-Forêt - BTG - AFRITEC - BEAGGGES, Bamako, Mali. 61
- SED-CCL (1999a) *Schéma directeur d’approvisionnement en bois énergie de Koutiala*. Rapport technique, Ministère de l’environnement et Ministère des mines, de l’énergie et de l’hydraulique du Mali, Projet énergie domestique / groupement SEED - CIRAD-Forêt - BTG - AFRITEC - BEAGGGES, Bamako, Mali. 61
- SED-CCL (1999b) *Schéma directeur d’approvisionnement en bois énergie de Mopti*. Rapport technique, Ministère de l’environnement et Ministère des mines, de l’énergie et de l’hydraulique du Mali, Projet énergie domestique / groupement SEED - CIRAD-Forêt - BTG - AFRITEC - BEAGGGES, Bamako, Mali. 61
- SHEIL, D., DUCEY, M.J., SIDYASA, K. & SAMSOEDIN, I. (2003) A new type of sample unit for the efficient assessment of diverse tree communities in complex forest landscapes. *Journal of Tropical Forest Science* **15**, 117–135. 79
- SHIVER, B.D. & BORDERS, B.E. (1996) *Sampling techniques for forest resource inventory*. Wiley & Sons, New York. 9
- SMALTSCHINSKI, T.K. (1981) *Density and spatial patterns of forest stand*. Thèse de doctorat, Faculty of Forest Science, Albert Ludwig University, Freiburg in Brisgau, Germany. Titre en allemand : Bestandesdichte und Verteilungsstruktur. 79

- SMEKTALA, G., HAUTDIDIER, B., GAUTIER, D., PELTIER, R., NJIEMOUN, A. & TAPSOU (2002) Construction de tarifs de biomasse pour l'évaluation de la disponibilité ligneuse en zone de savanes au nord-Cameroun. In: *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, mai 2002, Maroua, Cameroun* (Eds. J. J. Y. & L. SEINY BOUKAR). Prasac, N'Djamena, Tchad, 10. [84](#), [85](#), [86](#)
- STOYAN, D. & STOYAN, H. (1994) *Fractals, Random Shapes and Point Fields*. John Wiley & Sons, Chichester. [15](#), [16](#), [78](#)
- SYLLA, M.L. (1997) *Évaluation rapide de la productivité et de la production des formations végétales : bassins de Bamako et de Ségou*. Rapport de mission, 9–13 juin et 23 juin–20 juillet 1987, République du Mali, Ministère des mines, de l'énergie et de l'hydraulique, Direction nationale de l'hydraulique et de l'énergie, Ministère du développement rural et de l'environnement, Direction nationale de l'aménagement et de l'équipement rural, Bamako, Mali. [10](#), [22](#), [61](#), [62](#), [63](#), [78](#), [79](#)
- SYLLA, M.L. (2000) *Éléments d'aménagement forestier pour les marchés ruraux*. rapport sed, Ministère des mines, de l'énergie et de l'hydraulique et Ministère du développement rural et de l'eau du Mali, Stratégie énergie domestique, Bamako, Mali. [43](#), [82](#)
- SYLLA, M.L. & NOUVELLET, Y. (2001) Détermination de la productivité des formations savaniques. In: *Aménagement intégré des forêts naturelles des zones tropicales sèches de l'Afrique de l'ouest* (Ed. P. D. SAVADOGO). CNRST, Ouagadougou, Burkina Faso et Sveriges Lantbruks Universitet, Uppsala, Suède, 135–142. Actes du séminaire international, 16–20 novembre 1998 à Ouagadougou, Burkina Faso. [61](#)
- THOMPSON, H.R. (1956) Distribution of distance to n^{th} neighbour in a population of randomly distributed individuals. *Ecology* **37**, 391–394. [79](#)
- TIETEMA, T. (1993) Biomass determination of fuelwood trees and bushes of Botswana, Southern Africa. *Forest Ecology and Management* **60**, 257–269. [85](#), [87](#), [88](#), [90](#)
- TOLSMA, D.J., ERNEST, W.H.O. & VERWEY, R.A. (1987) Nutrients in soil and vegetation around two artificial waterpoints in eastern Botswana. *Journal of Applied Ecology* **24**, 991–1000. [85](#)
- VALENTINE, H.T., TRITTON, L.M. & FURNIVAL, G.M. (1984) Subsampling trees for biomass, volume, or mineral content. *Forest Science* **30**, 673–681. [84](#)
- ZEIDE, B. (1980) Plot size optimization. *Forest Science* **26**, 251–257. [23](#)

Glossaire

Échantillonnage : un échantillon est une petite partie d'une forêt, qui, bien tiré, permet de caractériser tant en qualité (bois de service, bois de feu, bois d'œuvre...) qu'en quantité (volume, nombre de tiges...) les ressources de cette forêt. Ainsi le prélèvement d'une petite quantité de la forêt pour l'analyse de ses ressources s'appelle l'échantillonnage.

Flasher : pratiquer la marque du même côté sur les arbres de la placette ayant fait l'objet de mensuration, ceci dans le souci d'éviter un comptage erroné.

GPS : « Global Positioning System » ou système de positionnement global. Le GPS est un appareil de navigation utilisé à bord des avions, des bateaux, des véhicules de tourisme, etc. Il est aussi utilisé dans les travaux de levés de points géographiques en forêt. Il donne les coordonnées géographiques du point où l'on se trouve sur la terre dans un référentiel. Ces coordonnées sont calculées à partir de positions de satellites avec lequel le GPS dialogue. En théorie, trois satellites suffisent pour déterminer la position d'un point sur terre (en pratique, il en faut un peu plus).

Peuplement : c'est un ensemble d'arbres qui croissent sur un terrain forestier. Cet ensemble se distingue des parties avoisinantes par l'âge, la composition en espèces et la densité. Sa surface doit être suffisante pour justifier un traitement particulier. En pratique, la taille minimale est de l'ordre de quelques ares jusqu'à 0,5 ha et davantage.

Production : la production totale d'une forêt est la quantité de matière fabriquée depuis son origine. Dans le contexte spécifiquement forestier, l'origine choisie est généralement la naissance du peuplement. On parlera ainsi de production totale depuis l'origine. La production en volume exprimée en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ est une fonction croissante du temps.

Productivité : c'est la quantité de matière fabriquée par unité de temps. L'unité de temps employée pour exprimer une productivité sera l'année ; l'année est une unité pratique en gestion forestière car elle correspond à l'échelle de temps sur laquelle nous observons au mieux le phénomène de croissance. La productivité, en d'autres termes, représente la vitesse d'accroissement d'une forêt, exprimée en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. Mais l'intervalle de temps sur lequel cet accroissement est défini n'est pas forcément égal à un an.

Quota : la fixation de quota est une méthode d'organisation de l'exploitation de bois pour laquelle on attribue à chaque unité de surface une quantité précise de bois à prélever annuellement. Cette quantité doit être compatible avec la productivité de la forêt dans un souci de gestion durable, mais aussi de la capacité de prélèvement de bois des populations.

Recouvrement : il s'agit du pourcentage de superficie qui est recouverte par la projection des couronnes (houppier) des arbres et des arbustes sur le sol. Dans la figure 4.6, le ratio entre le noir (recouvert) et le blanc (non recouvert) est égal au taux de recouvrement. Dans cet exemple, il est égal à 75 %.

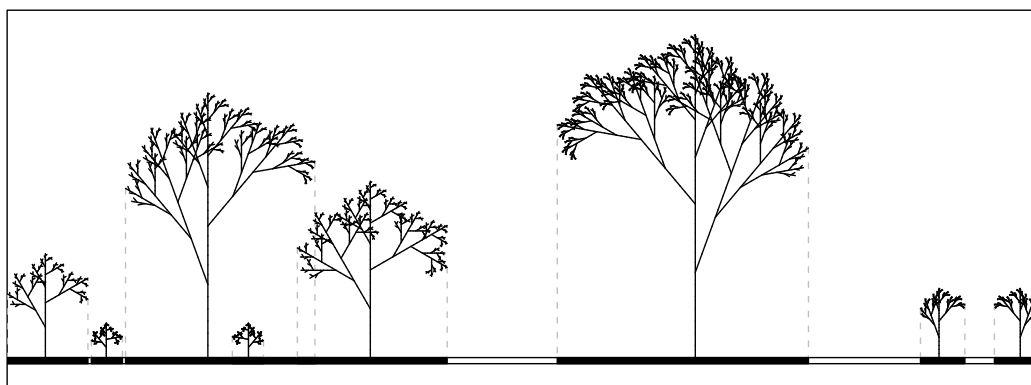


FIG. 4.6 – *Détermination du recouvrement à partir de la projection verticale des houppiers.*

Stère : unité de volume apparent d'un mètre cube, pour des bois soigneusement empilés, parallèlement les uns aux autres, avec un minimum de vide.

Toposéquence : la topographie est l'art de représenter dans le plan les formes du terrain avec les détails naturels ou artificiels qu'il porte. La succession d'ensemble de ces formes représente la toposéquence. Dans le contexte

forestier il s'agit de la succession des différents éléments du relief dont est tributaire la répartition des formations végétales.

Transect : il s'agit du cheminement à suivre en forêt de manière à traverser perpendiculairement les différents états de la végétation. Les unités d'inventaires sont engrangées le long de ce cheminement. Il faut pour cela connaître l'azimut magnétique de direction reliant les unités d'inventaires. On chemine du centre d'une placette d'inventaire vers le centre d'une placette voisine en suivant le même trajet défini au préalable.

Annexes

Annexe A

Méthodes d'inventaire par distances

Les méthodes d'inventaire par distances remontent aux années 50. Le principe de ces méthodes est d'utiliser la distance entre le point d'inventaire et un arbre du peuplement selon une règle fixée à l'avance pour estimer la densité du peuplement. Si on mesure la distance du point d'inventaire à l'arbre le plus proche, on comprend bien par exemple que plus le peuplement sera dense, plus cette distance sera faible. Ces méthodes peuvent être adaptées selon le même principe pour estimer la surface terrière, le volume, ou toute autre caractéristique quantitative du peuplement. La figure A.1 montre les différents types de distances le plus souvent utilisées : en (a), la distance X_p représente la distance du point d'inventaire (indiqué par une croix) au p^{e} arbre le plus proche (ici $p = 4$) ; en (b), on tire un arbre au hasard (qui devient le point d'inventaire), et on mesure la distance Y de cet arbre à son plus proche voisin ; en (c), on recherche l'arbre le plus proche du point d'inventaire, puis on mesure la distance T de cet arbre à son plus proche voisin dans le demi-plan excluant le point d'inventaire et dont la limite passe par cet arbre et est perpendiculaire à la droite joignant le point d'inventaire au plus proche arbre ; en (d), on mesure la longueur L_p d'un transect de largeur fixée, qui part du point d'inventaire et qui contient p arbres (ici $p = 4$) ; en (e), on divise le plan en m secteurs égaux (ici $m = 4$), puis on mesure dans chaque secteur i la distance Q_{ip} au p^{e} plus proche arbre (ici $p = 2$) ; enfin en (f), on recherche l'arbre le plus proche du point d'inventaire, puis l'arbre le plus proche de ce dernier, etc., jusqu'à mesurer la distance Z entre le $(p-1)^{\text{e}}$ et le p^{e} arbre (ici $p = 4$).

Le tableau A.1 récapitule les principales méthodes d'inventaire forestier par distances existantes dans la littérature scientifique. Ces méthodes ont l'avantage d'être très facile à mettre œuvre et permettent donc un gain de

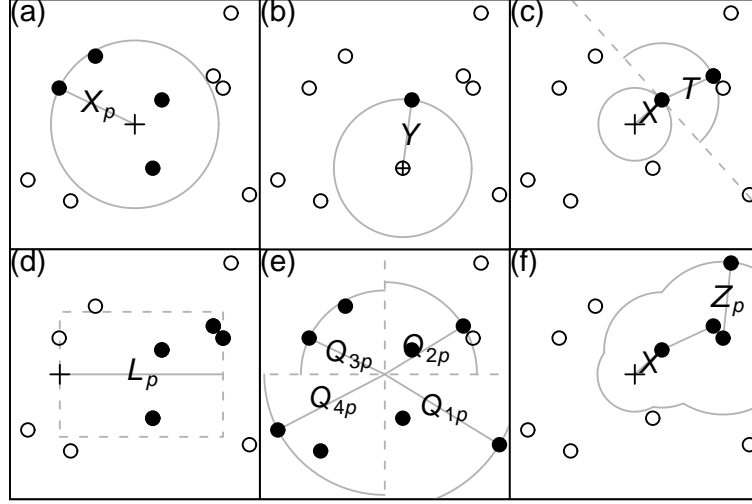


FIG. A.1 – Différents types de distances entre point d'inventaire et arbres du peuplement utilisées par les méthodes d'inventaire par distances.

temps. En revanche elles sont généralement moins efficaces qu'un inventaire aléatoire utilisant des placettes de taille fixe (c'est-à-dire qu'à surface échantillonnée égale, elles fournissent une estimation de précision moindre). Mais le principal inconvénient de ces méthodes reste que l'estimation dépend non seulement de la densité des arbres, mais aussi de leur mode de répartition spatiale. La dépendance vis-à-vis du mode de répartition spatiale des arbres est au premier ordre (espérance), contrairement aux méthodes d'inventaire basées sur des placettes de taille fixe où la dépendance est au second ordre (variance).

Pour illustrer cela, supposons que l'on veuille estimer la densité du peuplement à partir de la distance X du point d'inventaire au quatrième plus proche arbre, comme dans Sylla (1997). Si les arbres sont répartis au hasard, alors $\lambda\pi X^2$ suit une loi gamma de paramètre 4 (Stoyan & Stoyan, 1994, p.215), où λ est la densité (à estimer) du peuplement. Par conséquent :

$$\hat{\lambda} = \frac{4N - 1}{\pi \sum_{i=1}^N X_i^2}$$

est un estimateur non biaisé de l'intensité λ , où N est le nombre de points d'inventaire et X_i la distance mesurée au i^e point d'inventaire. Seulement le mode de répartition des arbres est inconnu *a priori*. Supposons qu'en réalité les arbres ne sont pas répartis au hasard (comme dans la figure A.2a), mais par groupes de f individus, les agrégats étant répartis au hasard (comme dans la figure A.2b où $f = 6$). La densité des agrégats est par conséquent de

TAB. A.1 – *Les principales méthodes d’inventaire par distances. Le type de distance renvoie à la figure A.1, tandis que le type de méthode renvoie à la classification des méthodes par distances établie par Persson (1971).*

Référence	Type de distance	Type de méthode	Référence	Type de distance	Type de méthode
Moore (1954)	X_1	$1/(\sum X^2)$	Holgate (1965b)	Y	$1/(\sum X^2)$
Morisita (1954)	–	–	Diggle (1975, 1977)	–	–
Batcheler (1971)	–	–	Cottam & Curtis (1956)	–	$(1/\sum X)^2$
Diggle (1975, 1977)	–	–	Pollard (1971)	Q_{1p}	$1/(\sum X^2)$
Cottam & Curtis (1956)	–	$(1/\sum X)^2$	Morisita (1954)	–	$(1/\sum X)^2$
Persson (1964)	–	–	Cottam & Curtis (1956)	–	–
Holgate (1965a)	–	–	Catana (1963)	–	–
Persson (1971)	–	–	Mawson (1968)	Q_{kp}	$1/(\sum X^2)$
Patil <i>et al.</i> (1979, 1982)	–	autre	Engeman <i>et al.</i> (1994)	–	–
Clayton & Cox (1986)	–	–	Morisita (1957)	–	$\sum(1/X^2)$
Morisita (1954)	X_p	$1/(\sum X^2)$	Engeman <i>et al.</i> (1994)	–	–
Thompson (1956)	–	–	Mawson (1968)	–	autre
Keuls <i>et al.</i> (1963)	–	–	Kendall & Moran (1963)	Z_1	$1/(\sum X^2)$
Holgate (1964)	–	–	Cox (1976)	–	–
Pollard (1971)	–	–	Clayton & Cox (1986)	–	–
Sylla (1997)	–	–	Cox (1976)	–	$\sum(1/X^2)$
Keuls <i>et al.</i> (1963)	–	$\sum(1/X^2)$	Cottam & Curtis (1956)	–	$(1/\sum X)^2$
Persson (1964)	–	–	Clayton & Cox (1986)	–	–
Eberhardt (1967)	–	–	Clayton & Cox (1986)	–	autre
Mawson (1968)	–	–	Engeman <i>et al.</i> (1994)	Z_p	$1/(\sum X^2)$
Prodan (1968b)	–	–	Diggle (1975, 1977)	T	$1/(\sum X^2)$
Payandeh & Ek (1986)	–	–	Aherne & Diggle (1978)	–	–
Jonsson <i>et al.</i> (1992)	–	–	Clayton & Cox (1986)	–	–
Lynch & Rusydi (1999)	–	–	Byth (1982)	–	$(1/\sum X)^2$
Lessard <i>et al.</i> (2002)	–	–	Clayton & Cox (1986)	–	–
Morisita (1954)	–	$(1/\sum X)^2$	Engeman <i>et al.</i> (1994)	–	–
Thompson (1956)	–	–	Clayton & Cox (1986)	–	autre
Lewis (1975)	–	–	Parker (1979)	L	$1/(\sum X^2)$
Payandeh & Ek (1986)	–	–	Parker (1979)	–	$\sum(1/X^2)$
Persson (1964)	–	autre	Sheil <i>et al.</i> (2003)	–	–
Lewis (1975)	–	–	Smaltschinski (1981)	X_p	autre

λ/f . La distance X que l'on va mesurer d'un point d'inventaire au quatrième plus proche arbre aura la même loi de distribution que la distance X' d'un point d'inventaire au plus proche arbre d'un peuplement de densité λ/f dont les arbres seraient répartis au hasard. Par conséquent $(\lambda/f)\pi X^2$ suit une loi gamma de paramètre 1, et l'estimateur $\hat{\lambda}$ est alors biaisé et le biais vaut :

$$B = \frac{4N - 1}{f(N - 1)}$$

De manière asymptotique (quand la taille N de l'échantillon tend vers l'infini), le biais résiduel est de $4/f$, ce qui fait un biais résiduel de 20 % pour $f = 5$, de 33 % pour $f = 6$, etc.

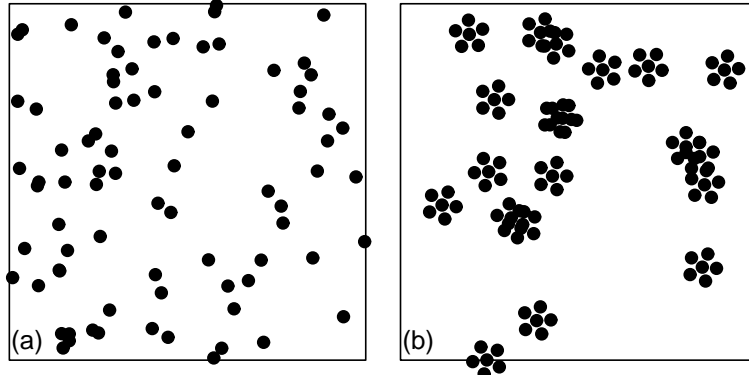


FIG. A.2 – *Exemples de répartitions spatiales : (a) les arbres sont répartis au hasard ; (b) les arbres sont répartis en agrégats de six, les agrégats étant répartis au hasard.*

Ce simple exemple montre que le biais peut être très important dès que l'on se trompe sur la nature de la répartition spatiale des arbres et qu'un estimateur est utilisé à mauvais escient. En d'autres termes, chaque estimateur est tributaire d'un mode de répartition spatiale des arbres et ne peut pas être utilisé dans d'autres cas de figure. Déterminer le mode de répartition spatiale des arbres n'est par ailleurs pas une mince affaire, et on ne peut donc pas le poser en préalable au choix de l'estimateur. Pour minimiser le risque de choisir un estimateur qui n'est pas adapté au mode de répartition spatiale des arbres, il est possible d'utiliser un estimateur robuste. [Picard *et al.* \(2005b\)](#); [Picard & Bar-Hen \(in press\)](#) ont ainsi développé un estimateur robuste par distances pour des répartitions agrégées d'arbres. L'expression de cet estimateur est cependant complexe et nécessite un traitement délicat des données. Ce traitement de données n'est guère recommandable dans la perspective d'une estimation rapide de la ressource.

Annexe B

Tarifs de cubage pour les savanes d'Afrique de l'ouest

Cette annexe récapitule quelques uns des tarifs de cubage relatifs aux savanes sèches d'Afrique de l'ouest, sans prétention à l'exhaustivité.

B.1 Tarifs toutes essences confondues

B.1.1 Tarifs de peuplement

Tarif du PIRL. Le [PIRL \(1991, p.59–60\)](#) a construit les tarifs peuplement suivants pour le Mali :

- pour le domaine soudano-guinéen ($R^2 = 0.99$) :

$$V = -1.18479 + 0.02629N_1 + 0.12760N_2 + 0.43304N_3 + 0.94207G_4$$

- pour le domaine soudanien-sud ($R^2 = 0.98$) :

$$V = 0.17317 + 0.02181N_1 + 0.11117N_2 + 0.35019N_3 + 0.95022G_4$$

- pour le domaine soudanien-nord ($R^2 = 0.90$) :

$$V = 0.44373 + 0.10721GF_1 + 0.20019GFA$$

où V est le volume en m^3 sur une surface de 0,5 ha ; N_i est l'effectif de tiges de circonférence à 1 m 30 comprise entre, respectivement, 22 et 39 cm ($i = 1$), 40 et 69 cm ($i = 2$), 70 et 99 cm ($i = 3$) ; G_4 est la somme des carrés des circonférences des tiges de circonférence supérieure ou égale à 100 cm ; GF_1 est la somme des circonférences à la base élevée au carré des faciès intermédiaires à partir de 22 cm ; enfin GFA est la somme des

TAB. B.1 – *Coefficients donnant le volume moyen d’une tige par classes de circonférence à 1 m 30, en fonction de la pluviométrie.*

Classe	C_{\min} cm	C_{\max} cm	Pluviométrie (mm an ⁻¹)			
			300–500	500–800	800–1100	> 1100
1	10	19	0.002	0.002	0.002	0.003
2	20	29	0.007	0.008	0.009	0.011
3	30	39	0.009	0.022	0.032	0.037
4	40	49	0.027	0.029	0.071	0.083
5	50	59	0.045	0.065	0.106	0.114
6	60	69	0.094	0.115	0.158	0.243
7	70	79	0.156	0.230	0.254	0.469
8	80	89	0.192	0.298	0.380	0.583
9	90	99	0.265	0.360	0.518	0.710
10	100	109	0.306	0.580	0.706	1.086
11	110	119	0.551	0.773	0.904	1.243
12	120	129	0.718	0.976	1.246	1.348
13	130	139	0.773	1.094	1.493	1.579
14	140	∞	1.181	1.694	1.935	2.495

circonférences à la base élevée au carré pour des arbres à partir de 22 cm. Le tarif soudano-guinéen est basé sur un effectif de 415 parcelles de 0,5 ha ; le tarif soudanien-sud est basé sur un effectif de 521 parcelles de 0,5 ha ; le tarif soudanien-nord est basé sur 422 parcelles de 0,5 ha. Le tarif soudanien-nord est par ailleurs sujet à caution car il ne tient pas compte des buissons et est biaisé pour les parcelles à fort pourcentage de petites tiges.

Tarif SED. La Stratégie Énergie Domestique a utilisé le tarif peuplement suivant (Nouvellet, 2002; Sylla, 2000) :

$$V = \sum_{i=1}^{14} a_{ip} N_i$$

où V est le volume (en m³), N_i est le nombre de tiges dans la classe de circonférence i , et les a_{ip} sont des coefficients qui dépendent à la fois de la classe de circonférence i et de la pluviométrie de la zone. Quatorze classes de circonférences sont définies : la classe 1 va 10 à 19 cm, ..., la classe i va de $10i$ à $10i + 9$ cm, et la classe 14 regroupe toutes les circonférences de plus de 140 cm. Les circonférences sont mesurées à 1 m 30. Les valeurs des coefficients a_{ip} sont données dans le tableau B.1.

B.1.2 Tarifs individuels

Tarif de Nazinon. À Nazinon ([INERA, 1998](#)), le tarif suivant a été élaboré :

$$P = 31.05 - 7.1201D + 0.6497D^2$$

où P est le poids frais en kg et D est le diamètre à 1 m 30 en cm. Le tarif a été élaboré à partir de 872 individus de diamètre à 1 m 30 compris entre 5 et 25 cm, avec un R^2 de 0,83. Les arbres ont été pesés après débitage jusqu'à un diamètre de découpe de 3 cm.

Tarifs du PIRL. Le [PIRL \(1991, p.60\)](#) a construit le tarif individuel suivant pour la zone soudanienne-nord du Mali :

$$V = 0.03879 - 0.33235C_b + 0.83915C_b^2$$

où V est le volume en m^3 et C_b est la circonférence à la base. Le tarif a été élaboré à partir de 725 individus de circonférence à la base supérieure à 22 cm, avec un R^2 de 0,95. Le tarif suivant a également été construit par le PIRL (*in* [Bagnoud & Kouyaté, 1996](#)) :

$$V = -0.03263 + 0.16223C + 0.49948C^3$$

où V est le volume total en m^3 et C est la circonférence à 1 m 30 en m. Ce tarif est valable pour $0.22 \leq C \leq 1.60$ m et pour la zone au sud de l'isohyète 900 mmm.

Tarifs SED. La Stratégie Énergie Domestique a utilisé le tarif individuel suivant ([Nouvellet, 2002](#)) :

$$V = -0.03263C + 0.16223C^2 + 0.49948C^3$$

où V est le volume total sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence (tronc et houppier) en m^3 et C est la circonférence à 1 m 30 en cm. Le tarif a été élaboré à partir de 1410 individus de circonférence comprise entre 22 cm et 1 m 60. En outre, le tarif suivant a été utilisé pour le volume de bois de feu :

$$V_f = 3107.5 - 331.1C_b + 13.998C_b^2$$

où V_f est le volume de bois de feu en cm^3 et C_b est la circonférence à la base en cm. Le volume de bois de feu est défini comme le volume total (défini précédemment) moins le volume de bois d'œuvre.

Tarifs de la boucle du Mouhoun. Les tarifs suivants ont été établis dans la boucle du Mouhoun au Burkina Faso ([Kaboré, 1992](#)) :

$$\begin{aligned} V &= -0.0018199 + 0.0011781D + 0.000021004064D^3 \\ P &= -2.0854053 + 1.2414834D + 0.01913697D^3 \\ P_s &= -1.2286732 + 0.70230016D + 0.1049166D^3 \end{aligned}$$

où V est le volume total en m^3 , D est le diamètre à 1 m 30 en cm, P est le poids frais en kg et P_s est le poids sec en kg. Les tarifs ont été établis par régression pondérée à partir d'un échantillon de 118 arbres de 37 espèces différentes. Les R^2 sont des 0.919, 0.889 et 0.862 respectivement pour le volume, le poids frais et le poids sec. Le volume et le poids ont été estimés par une méthode de sous-échantillonnage des arbres ([Valentine et al., 1984](#)). Le volume et le poids frais ont été déterminés sur le terrain, tandis que le poids sec a été déterminé après étuvage des échantillons.

Tarif ARFS. L'ARFS a établi le tarif suivant pour la région de Sikasso ([Bagnoud & Kouyaté, 1996](#)) :

$$V = 0.0148 - 0.1497C + 0.719C^2$$

où V est le volume total en m^3 et C est la circonférence à 1 m 30 en m. Le tarif a été établi à partir d'un échantillon de 286 arbres et est valable pour $0.15 \leq C \leq 1.05$ m. Le R^2 est de 0.91. Le volume a été mesuré en abattant les arbres et en séparant la tige et le houppier. Le volume de la tige a été mesurée en utilisant la formule de Newton, tandis que le volume du houppier a été mesuré en utilisant la formule de Huber, après découpage en billons de 1 m de long.

B.2 Tarifs spécifiques

Nous ne précisons pas la façon dont les grandeurs ont été estimées. Dans certains cas, la méthode de mesure utilisée a été présentée dans la partie précédente. Dans les autres cas, il faudra se reporter à la référence citée. Nous insistons sur le fait que la méthode de mesure peut grandement influencer l'estimation obtenue ; des différences numériques observées ne tiennent qu'à cela.

B.2.1 *Acacia gerrardii*

Biomasse totale vs. circonférence à 50 cm du sol : $B = 247.655C_b^{1.9684}$ ($n = 35$, $R^2 = 0.89$) avec B en kg et C_b en m, au nord Cameroun ([Smektala](#)

et al., 2002).

B.2.2 *Acacia mellifera*

Biomasse vs. surface terrière à la base : $B = 0.2081G_b^{1.2193}$ ($n = 35$, $R^2 = 0.97$) avec B en kg et G_b en cm^2 , au Botswana (Tietema, 1993).

B.2.3 *Acacia senegal*

Volume du tronc vs. circonférence à la base : $\ln V_t = 2.55 \ln C_b + 0.07$ ($R^2 = 0.99$) avec V en cm^3 et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse du tronc vs. circonférence à la base : $\ln B_t = -3.45 + 2.73 \ln C_b$ ($R^2 = 0.98$, $n = 21$) avec B_t en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse totale vs. circonférence à 50 cm du sol : $B = 443.929C_b^{2.3783}$ ($n = 37$, $R^2 = 0.86$) avec B en kg et C_b en m, au nord Cameroun (Smektala *et al.*, 2002).

B.2.4 *Acacia tortilis*

Biomasse vs. surface de la couronne : $B = 0.5331S^{1.6488}$ ($n = 62$, $R^2 = 0.89$) avec B en kg et S en m^2 , au Botswana (Tietema, 1993). Biomasse vs. surface terrière à la base : $B = 0.1813G_b^{1.1504}$ ($n = 62$, $R^2 = 0.96$) ou $B = 0.1975G_b^{1.1859}$ ($n = 109$, $R^2 = 0.93$) avec B en kg et G_b en cm^2 , au Botswana (Tietema, 1993). Biomasse vs. hauteur : $B = 5.7696 \cdot 10^{-9} H^{3.9140}$ ($n = 62$, $R^2 = 0.67$) avec B en kg et H en cm, au Botswana (Tietema, 1993). Biomasse épigée fraîche vs. circonférence à la base : $B = 0.005358C_b^{2.70}$ ($n = 181$, $R^2 = 0.84$) avec B en kg et C_b en cm, au Botswana (Tolsma *et al.*, 1987).

B.2.5 *Afzelia africana*

Volume total vs. circonférence à 1 m 30 : $V = 0.1271 - 0.5633C + 1.0608C^2$ ($n = 84$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994a). Au Mali (Nouvellet, 2002), $V = -0.05182C + 0.24489C^2 + 0.56703C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 100$) avec V en m^3 et C en cm (V est le volume total sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houppier). Volume total vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V = -0.0019 + 0.04846C^2H$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994a). Volume du tronc vs. circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.9121 + 1.3419C - 0.1806C^2$ ($n = 84$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994a). Volume du tronc vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.6023 + 0.2531C\sqrt{H} - 0.00566C^2H$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe

et al., 1994a). Volume du tronc vs. hauteur du tronc + circonférence à 1 m 30 : $V_t = 0.0782 + 0.05665C^2H_t$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H_t et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994a). Volume bois de feu vs. circonférence à 1 m 30 : $V_f = 2.3731 - 3.5751C + 1.7462C^2$ ($n = 84$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994a). Volume bois de feu vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V_f = 1.0481 - 0.3698C\sqrt{H} + 0.06082C^2H$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994a).

B.2.6 *Anogeissus leiocarpus*

Biomasse totale vs. circonférence à 50 cm du sol : $B = 325.386C_b^{2.6132}$ ($n = 24$, $R^2 = 0.88$) avec B en kg et C_b en m, au nord Cameroun (Smektala *et al.*, 2002).

B.2.7 *Balanites aegyptiaca*

Volume du tronc vs. circonférence à la base : $\ln V_t = 2.55 \ln C_b + 0.07$ ($R^2 = 0.99$) avec V en cm^3 et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse du tronc vs. circonférence à la base : $\ln B_t = -3.19 + 2.59 \ln C_b$ ($R^2 = 0.99$, $n = 35$) avec B_t en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979).

B.2.8 *Bombax costatum* (*Bombax buonopozense*)

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houp-pier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.00387C + 0.04665C^2 + 0.58410C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 103$) avec V en m^3 et C en cm, au Mali (Nouvellet, 2002).

B.2.9 *Boscia senegalensis*

Volume du tronc vs. circonférence à la base : $\ln V_t = 2.26 \ln C_b + 0.38$ ($R^2 = 0.99$) avec V en cm^3 et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse du tronc vs. circonférence à la base : $\ln B_t = -2.75 + 2.04 \ln C_b$ ($R^2 = 0.97$, $n = 20$) avec B_t en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979).

B.2.10 *Combretum fragrans* (*Combretum ghasalense*)

Volume total vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.0066 + 0.0023C + 0.4752C^2$ ($0.15 \leq C \leq 0.70$, $n = 56$, $R^2 = 0.93$) avec V en m^3 et C en m, dans la région de Sikasso (Bagnoud & Kouyaté, 1996).

B.2.11 *Combretum glutinosum*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houppier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.00707C + 0.07584C^2 + 0.57874C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.10$, $n = 110$) avec V en m^3 et C en cm, au Mali (Nouvellet, 2002).

B.2.12 *Combretum micranthum*

Poids sec vs. diamètre équivalent à la base : $P_s = 1.1059 \exp(-1.529 + 1.6298 \ln \bar{D}_b)$ ($R^2 = 0.69$) où P_s en kg est relatif à la cépée entière et \bar{D}_b est en cm, à Guesselbodi (Alegria et al., 1986). Poids sec vs. diamètre équivalent à la base, surface du houppier et nombre de tiges de diamètre supérieur à 4 cm : $P_s = 1.0946 \exp(-1.797 + 1.5162 \ln \bar{D}_b + 0.2915 \ln S - 0.2309 \ln N_4)$ ($R^2 = 0.73$) où P_s en kg est relatif à la cépée entière, \bar{D}_b est en cm, à Guesselbodi (Alegria et al., 1986).

B.2.13 *Combretum molle*

Biomasse vs. surface terrière à la base : $B = 0.1529 G_b^{1.1141}$ ($n = 6$, $R^2 = 0.94$) avec B en kg et G_b en cm^2 , au Botswana (Tietema, 1993).

B.2.14 *Combretum nigricans*

Poids sec vs. diamètre équivalent à la base : $P_s = 1.0654 \exp(-3.038 + 2.3393 \ln \bar{D}_b)$ ($R^2 = 0.88$) où P_s en kg est relatif à la cépée entière et \bar{D}_b est en cm, à Guesselbodi (Alegria et al., 1986). Poids sec vs. diamètre équivalent à la base, surface du houppier et somme des diamètres des tiges de diamètre supérieur à 4 cm : $P_s = 1.0489 \exp(-2.536 + 2.3517 \ln \bar{D}_b + 0.3089 \ln S - 0.4358 \ln(\sum D))$ ($R^2 = 0.91$) où P_s en kg est relatif à la cépée entière, \bar{D}_b est en cm, et $\sum D$ est la somme des diamètres des tiges qui composent la cépée, à Guesselbodi (Alegria et al., 1986).

B.2.15 *Commiphora africana*

Volume du tronc vs. circonférence à la base : $\ln V_t = 2.26 \ln C_b + 0.38$ ($R^2 = 0.99$) avec V en cm^3 et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse du tronc vs. circonférence à la base : $\ln B_t = -3.43 + 2.53 \ln C_b$ ($R^2 = 0.99$, $n = 15$) avec B_t en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse grosses branches vs. circonférence à la base : $\ln B_B = -4.96 + 3.56 \ln C_b$ ($R^2 = 1.00$, $n = 10$) avec B_B en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979).

B.2.16 *Cordyla pinnata*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houp-pier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.02038C + 0.13130C^2 + 0.51060C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 663$) avec V en m^3 et C en cm, au Mali (Nouvellet, 2002).

B.2.17 *Daniellia oliveri*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houp-pier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.04295 + 0.21910C + 0.38396C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 94$) avec V en m^3 et C en m, au Mali (Bagnoud & Kouyaté, 1996; Nouvellet, 2002). $V = -0.0057 - 0.0386C + 0.5539C^2$ ($0.20 \leq C \leq 0.94$, $n = 60$, $R^2 = 0.95$) avec V en m^3 et C en m, dans la région de Sikasso (Bagnoud & Kouyaté, 1996).

B.2.18 *Dicrostachys cinerea*

Biomasse vs. surface terrière à la base : $B = 0.2787G_b^{1.0337}$ ($n = 33$, $R^2 = 0.85$) avec B en kg et G_b en cm^2 , au Botswana (Tietema, 1993).

B.2.19 *Diospyros mespiliformis*

Volume total vs. circonférence à 1 m 30 : $V = 0.0602 - 0.3299C + 0.8604C^2$ ($n = 82$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b). Volume total vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V = -0.203 + 0.03694C\sqrt{H} + 0.03383C^2H$ ($n = 82$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b). Volume du tronc vs. circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.2893 + 0.5090C^2$ ($n = 82$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b). Volume du tronc vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.0715 + 0.02370C^2H$ ($n = 82$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b). Volume du tronc vs. hauteur du tronc + circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.0982 + 0.1066C\sqrt{H_t} + 0.03628C^2H_t$ ($n = 82$) avec V en m^3 , H_t et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b). Volume bois de feu vs. circonférence à 1 m 30 : $V_f = 0.2304 + 0.2001C^2$ ($n = 82$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b). Volume bois de feu vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V_f = 0.2668 + 0.01048C^2H$ ($n = 82$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994b).

B.2.20 *Grewia bicolor*

Volume du tronc vs. circonférence à la base : $\ln V_t = 2.26 \ln C_b + 0.38$ ($R^2 = 0.99$) avec V en cm^3 et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse du tronc vs. circonférence à la base : $\ln B_t = -3.27 + 2.45 \ln C_b$ ($R^2 = 0.98$, $n = 16$) avec B_t en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979).

B.2.21 *Guiera senegalensis*

Volume du tronc vs. circonférence à la base : $\ln V_t = 2.26 \ln C_b + 0.38$ ($R^2 = 0.99$) avec V en cm^3 et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Biomasse du tronc vs. circonférence à la base : $\ln B_t = -2.54 + 1.96 \ln C_b$ ($R^2 = 0.96$, $n = 21$) avec B_t en kg et C_b en cm, à Fété Olé (Poupon, 1979). Poids sec vs. diamètre équivalent à la base : $P_s = 1.0806 \exp(-2.241 + 1.8577 \ln \bar{D}_b)$ ($R^2 = 0.65$) où P_s en kg est relatif à la cépée entière et \bar{D}_b est en cm, à Guesselbodi (Alegria et al., 1986).

B.2.22 *Isobertlinia doka*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houppier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.05182 + 0.24489C + 0.56703C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 100$) avec V en m^3 et C en m, au Mali (Bagnoud & Kouyaté, 1996; Nouvellet, 2002). $V = 0.0444 - 0.3464C + 1.0141C^2$ ($0.15 \leq C \leq 1.0$, $n = 60$, $R^2 = 0.96$) avec V en m^3 et C en m, dans la région de Sikasso (Bagnoud & Kouyaté, 1996).

B.2.23 *Khaya senegalensis*

Volume total vs. circonférence à 1 m 30 : $V = 0.3207 - 1.1957C + 1.4870C^2$ ($n = 84$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe et al., 1994c). Au Mali (Nouvellet, 2002), $V = -0.00537C + 0.06233C^2 + 0.54878C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 81$) avec V en m^3 et C en cm (V est le volume total sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houppier). Volume total vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V = -0.00485 + 0.04211C^2H$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe et al., 1994c). Volume du tronc vs. circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.3972 + 0.6291C^2$ ($n = 84$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe et al., 1994c). Volume du tronc vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V_t = -0.1743 + 0.02705C^2H$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe et al., 1994c). Volume du tronc vs. hauteur du tronc + circonférence à 1 m 30 : $V_t = 0.0498 + 0.05757C^2H_t$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H_t et C en m, à Badénou (Louppe et al., 1994c). Volume bois de

feu vs. circonférence à 1 m 30 : $V_f = 2.2598 - 3.4804C + 1.6684C^2$ ($n = 84$) avec V en m^3 et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994c). Volume bois de feu vs. hauteur totale + circonférence à 1 m 30 : $V_f = 0.0213 + 0.01953C^2H$ ($n = 84$) avec V en m^3 , H et C en m, à Badénou (Louppe *et al.*, 1994c).

B.2.24 *Lannea sp.*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houp-pier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.00442C + 0.05448C^2 + 0.56476C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.30$, $n = 98$) avec V en m^3 et C en cm, au Mali (Nouvellet, 2002).

B.2.25 *Pterocarpus erinaceus*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houp-pier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.01161C + 0.10180C^2 + 0.54409C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.50$, $n = 104$) avec V en m^3 et C en cm, au Mali (Nouvellet, 2002).

B.2.26 *Terminalia sp.*

Volume total (sur écorce jusqu'à 10 cm de circonférence, tronc et houp-pier) vs. circonférence à 1 m 30 : $V = -0.01564 + 0.13174C + 0.57929C^3$ ($0.22 \leq C \leq 1.40$, $n = 116$) avec V en m^3 et C en m, au Mali (Bagnoud & Kouyaté, 1996; Nouvellet, 2002). $V = 0.0067 - 0.1114C + 0.6995C^2$ ($0.15 \leq C \leq 0.79$, $n = 60$, $R^2 = 0.92$) avec V en m^3 et C en m, dans la région de Sikasso (Bagnoud & Kouyaté, 1996).

B.2.27 *Ziziphus mucronata*

Biomasse vs. surface terrière à la base : $B = 0.2772G_b^{0.8914}$ ($n = 30$, $R^2 = 0.80$) avec B en kg et G_b en cm^2 , au Botswana (Tietema, 1993).